

新型 Si_3N_4 层部分固定正电荷 AlGaIn/GaN HEMTs 器件耐压分析*

段宝兴^{1)†} 杨银堂¹⁾ Kevin J. Chen²⁾

1) (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)

2) (Department of Electronic and Computer Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Clear Water Bay, Hong Kong)

(2012年6月21日收到; 2012年7月10日收到修改稿)

为了优化传统 AlGaIn/GaN high electron mobility transistors 结构表面电场分布, 提高器件击穿电压和可靠性, 本文利用不影响 AlGaIn/GaN 异质结极化效应的 Si_3N_4 钝化层电荷分布, 提出了一种 Si_3N_4 钝化层部分固定正电荷 AlGaIn/GaN high electron mobility transistors 新结构. Si_3N_4 钝化层中部分固定正电荷通过电场调制效应使表面电场分布中产生新的电场峰而趋于均匀. 新电场峰使得新结构栅边缘和漏端高电场有效降低, 器件击穿电压从传统结构的 296 V 提高到新结构的 650 V, 而且可靠性改善. 通过 Si_3N_4 与 AlGaIn 界面横、纵向电场分布, 说明了产生表面电场峰的电场调制效应, 为设计 Si_3N_4 层部分固定正电荷新结构提供了科学依据. Si_3N_4 钝化层部分固定正电荷的补偿作用, 使沟道二维电子气浓度增加, 导通电阻减小, 输出电流提高.

关键词: AlGaIn/GaN, high electron mobility transistors, 固定电荷, 电场调制

PACS: 73.40.Kp, 73.40.Vz, 73.61.Ey

1 引言

氮化镓 (GaN) 弥补了前两代 Si 和 GaAs 等半导体材料本身固有的缺点, 从而成为飞速发展的第三代宽禁带半导体材料之一^[1,2]. 由于 GaN 材料相比 Si, GaAs 和 SiC 不同之处在于具有极化效应, 且外延在高热导率 SiC 衬底上的 AlGaIn/GaN HEMTs (high electron mobility transistors) 器件具有抗辐射、高频、大功率和高密度集成等特点, 成为军用微波信号放大系统的核心^[3]. AlGaIn/GaN HEMTs 是以 AlGaIn/GaN 异质结材料为基础而制造的 GaN 基微波器件. 与传统的 MESFET 器件相比, AlGaIn/GaN HEMTs 具有高跨导、高饱和电流以及高截止频率的优良特性. 实验证明, GaN 基 HEMT 在 1000 K 的高温下仍然保持着良好的直流特性, 从而减少甚至取消冷却系统, 使系统的体积和重量降低, 效率大大提高^[4].

由于 AlGaIn/GaN 异质结利用自发极化和压电

极化效应形成高密度二维电子气 (two dimensional electron gas, 2DEG), 使这种结构具有很低的导通电阻, 研究者针对 AlGaIn/GaN HEMTs 器件特殊的耐压机理已经设计了多种优化器件击穿电压和比导通电阻的方法和技术^[5-10], 这是因为硅基功率器件设计技术^[11-15]不能直接移植依靠高密度 2DEG 工作的 HEMTs 器件. 为了降低 GaN 缓冲层体漏电流, 要求 GaN 层的电阻率越高越好, 目前质量最好的 GaN 外延层电子浓度 (由氮空位或氧掺杂引起) 可以低于 10^{15} cm^{-3} . 然而即使这种低浓度的 GaN 层, 器件输出特性仍然表现为电阻, 而实际制作的 AlGaIn/GaN HEMTs 器件却能承担数百伏甚至千伏以上的电压. 我们分析认为, GaN 层中的受主型陷阱能有效俘获 GaN 层中引起漏电流的电子, 在减小器件泄漏电流的条件下, 使器件承受高电压^[8-10].

本文提出了一种 Si_3N_4 部分固定电荷新型 AlGaIn/GaN HEMTs 结构, 通过将固定正电荷注入 AlGaIn/GaN HEMTs 器件的表面钝化层 Si_3N_4 中, 利

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 61234006) 和国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 61106076, 61006052) 资助的课题.

† E-mail: bxduan@163.com

用作者提出的电场调制技术^[11-14]优化了器件表面电场分布,有效降低栅边缘高峰电场的条件下,使器件击穿电压提高;为了屏蔽 Si₃N₄ 层中的部分固定正电荷, AlGa_xN/GaN 异质结沟道中的电子浓度增加,器件的沟道电阻减小,输出电流增大.同时为了减小 GaN 缓冲层的泄漏电流,分析中将受主型陷阱加入 GaN 缓冲层中,使器件击穿特性的仿真结果与实验曲线符合.

2 器件结构

HEMTs 不同于 MOSFETs 和 MESFETs 之处在于通过异质结极化效应感应出导电沟道,异质结的极化包括压电极化和材料自发极化.为了屏蔽 AlGa_xN/GaN 异质结的极化感应电荷,在 GaN 表面的低势垒沟道区形成了用于导电的高密度 2DEG. AlGa_xN/GaN HEMTs 器件的耐压机理与传统 pn 结或 MOS 结构不同^[8-10],认识这种特殊的耐压机理是设计优化 AlGa_xN/GaN HEMTs 击穿电压的关键.

如图 1 所示为本文提出的 Si₃N₄ 层部分固定正电荷新型 AlGa_xN/GaN HEMTs 器件结构示意图,其中外延在半绝缘衬底(蓝宝石或碳化硅)上的 GaN 缓冲层为 n 型;然后通过异质外延非掺杂 AlGa_xN 层形成 AlGa_xN/GaN 异质结.2000 年之前,由于异质结外延工艺的缺陷,不能形成具有宏观极化效应的 AlGa_xN/GaN 异质结,器件沟道中的 2DEG 通过 AlGa_xN 中间外延层掺杂 Si 离子实现^[16],这与传统的 AlGaAs/GaAs 异质结设计相同.但是,在 AlGa_xN 中间外延层掺杂 Si 工艺过程中,扩散到外延炉壁表面的 Si 原子将返掺进入 GaN 缓冲层,使 GaN 缓冲层的电阻率下降,器件体漏电流增大而击穿电压降低.2000 年之后 AlGa_xN/GaN 异质结外延工艺技术的改进,可以实现具有宏观极化效应而形成高密度 2DEG^[17-20].然而由于氧的掺杂和氮的空位,目前外延最好的 GaN 缓冲层也表现出 n 型电阻特性,AlGa_xN/GaN HEMTs 源漏欧姆接触条件下,器件的电流-电压 ($I_{DS}-V_{DS}$) 输出特性为欧姆特性.为了降低 GaN 缓冲层的泄漏电流,国际上通过 GaN 缓冲层掺杂 Fe, Mg 等受主型陷阱俘获引起泄漏电流的电子实现^[21-23].但是,掺杂于 GaN 缓冲层中的受主型陷阱同时能俘获沟道中的 2DEG,使器件表现电流崩塌和频率分散效应^[24,25].为了缓解这种矛盾,我们已经提出了一种 F 离子注入 AlGa_xN/GaN HEMTs 器件源区的新型结构^[26].

在此分析基础上,为了进一步优化器件的表面电场分布,利用电场调制效应,本文提出了一种具有 Si₃N₄ 层部分固定正电荷新型 AlGa_xN/GaN HEMTs 结构.部分固定正电荷产生的附加电场调制了器件的表面电场分布,使器件栅边缘高峰电场降低,击穿电压提高.而且由于固定正电荷掺杂于器件表面的钝化层,不影响异质结的极化.高峰电场的降低,也缓解了热载流子效应,使器件可靠性改善.图 1 中的器件结构参数分别为: L_s 为源极长度; L_{gs} 为栅源距离; L_g 为栅极长度; L_{gd} 为栅漏距离; L_d 为漏极长度.本文讨论中非掺杂 AlGa_xN 外延层厚度为 20 nm, Al 掺杂浓度为 25%; GaN 缓冲层厚度为 3 μm , n 型浓度为 $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$; 器件结构参数为 $L_s = L_g = L_d = L_{gs} = 1 \mu\text{m}$, $L_{gd} = 5 \mu\text{m}$.

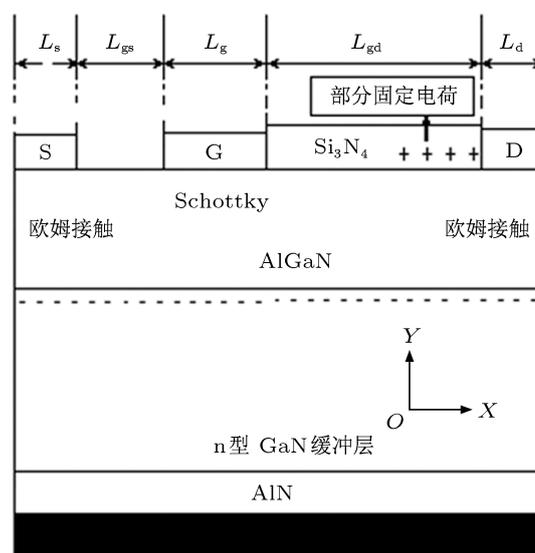


图 1 具有部分 Si₃N₄ 固定正电荷新型 AlGa_xN/GaN HEMTs 结构示意图

3 仿真结果及分析

由于 GaN 材料特殊的生长工艺,对于未掺杂的 GaN 缓冲层,导电性显示 n 型,并且浓度不小于 $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.非故意掺杂 GaN 缓冲层通过 MOCVD 生长时,由于氧的掺杂或氮的空位,导致 GaN 材料表现出低阻 n 型导电特性,形成的电子器件 $I_{DS}-V_{DS}$ 表现为欧姆特性^[8-10].当 AlGa_xN/GaN HEMT 器件的漏极为正偏压时,输出的 $I_{DS}-V_{DS}$ 由于源极和漏极欧姆接触而表现出欧姆特性.为了减小 GaN 缓冲区的泄漏电流以提高击穿电压,已经在 GaN 分子束外延工艺中引入了深能级缺陷.这些深能级缺陷起陷阱作用,可以

俘获从源电极发射的电子^[21-23], 这些电子是引起 GaN 缓冲层漏电的主要原因. 为了减小泄漏电流, 获得与击穿特性相同的曲线, 本文利用仿真软件, 在 GaN 缓冲层中引入受主型缺陷, GaN 层 n 型浓度一定时, 获得一定的击穿电压. 当漏极为正电压, 栅极形成的肖特基结反偏时, 从源电极释放的电子经过 GaN 缓冲层被受主型缺陷俘获, 大大减小了 GaN 层泄漏电流. 所以, 对于 AlGaIn/GaN HEMT 器件的模拟, 受主型缺陷是一个重要参数.

图 2 所示为本文提出的具有 Si₃N₄ 层部分固定正电荷新型 AlGaIn/GaN HEMTs 与传统结构的表面电场分布. 此处的表面电场位于 AlGaIn 与 GaN 异质结的界面. 可以看出, 对于一般结构, 即 Si₃N₄ 钝化层中没有任何电荷, 并且 GaN 缓冲层利用受主型缺陷降低体泄漏电流. 当漏电极电压为 296V 时, 达到表面电场最优分布, 即栅边缘电场峰与漏端电场峰等高. 此时漏端电场峰已经达到 GaN 材料的临界击穿电场, 所以, 认为传统结构器件击穿. 对于本文提出的新结构, 可以明显看出与传统结构表面电场分布不同之处在于, 电场分布中出现新的电场峰 Pk, Pk 的位置为 Si₃N₄ 部分固定正电荷处. 新电场峰的出现使漏端高电场降低, 当漏电压为 600 V 时, 具有最高电场的栅边缘还没有达到 GaN 材料临界击穿电场, 为了与传统结构比较, 新结构漏电极电压可以增加至 650 V 而使器件击穿. 所以, 从表面电场分布可以看出, 具有 Si₃N₄ 层部分固定正电荷使表面电场出现新的电场峰, 击穿电压从一般结构的 296 V 提高到 650 V.

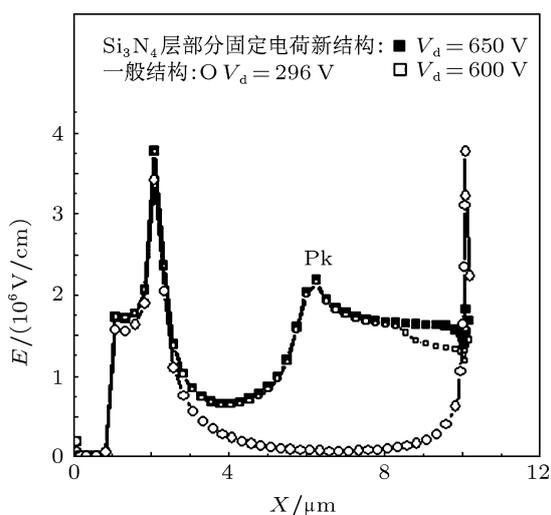


图 2 具有 Si₃N₄ 层部分固定正电荷新型 AlGaIn/GaN HEMTs 和传统结构表面电场分布

AlGaIn/GaN HEMTs 器件栅边缘高峰电场使器

件出现以下几个问题: 1) 器件发生击穿的位置一般位于栅电极边缘, 因为此处的高峰电场首先引起电子-空穴对离化, 达到雪崩条件时器件泄漏电流超过设定范围. 2) 在栅边缘高峰电场达到 GaN 材料临界击穿电场之前, 由于高电场效应, 使栅电极电子场致发射透穿进入 Si₃N₄ 表面钝化层, 发射的电子中和了 AlGaIn 极化层的表面正电荷, 减小的表面正电荷降低了用于补偿的高密度 2DEG 浓度, 使 AlGaIn/GaN HEMTs 输出电流降低, 这就是电流崩塌效应^[24,25]. 3) 高电场峰使电子-空穴对离化概率增加, 电离后的空穴在电场作用下进入沟道与 2DEG 中和, 使 2DEG 浓度降低而输出电流减小; 电离后的电子进入 AlGaIn 极化层使器件阈值电压和输出电流同时减小, 器件可靠性降低. 所以, 降低 AlGaIn/GaN HEMTs 器件栅边缘高峰电场是优化器件性能、提高器件特性和可靠性的关键. 本文提出的具有 Si₃N₄ 层部分固定正电荷新结构使表面电场分布中出现新的电场峰, 新电场峰使栅边缘与漏端高电场同时降低. 如图 3 所示, 当漏端电压小于 440 V 时, 栅边缘电场仅为 2.4×10^6 V/cm, 远小于 GaN 材料临界击穿电场 3.6×10^6 V/cm, 而对于一般结构, 漏端电压为 296 V 时, 栅边缘高峰电场已经达到 GaN 材料临界击穿电场. 随着 Si₃N₄ 层部分固定正电荷密度增加, 新电场峰 Pk 提高, 为了使器件达到雪崩击穿, 漏端电压可以提高到 650 V. 从图 3 的表面电场分布可以看出, 本文提出的新结构提高击穿电压的同时, 可以使器件峰值电场降低, 可靠性改善, 这就是电场调制效应的作用.

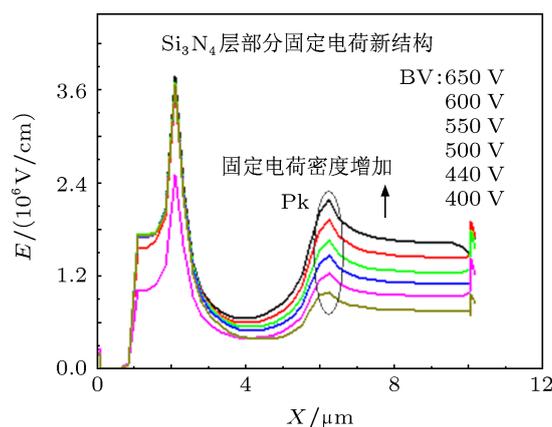


图 3 具有 Si₃N₄ 层部分固定正电荷新型 AlGaIn/GaN HEMTs 不同漏电压时的表面电场分布

图 4 所示为具有 Si₃N₄ 层部分固定正电荷新型 AlGaIn/GaN HEMTs 电荷密度与漏端电压关系曲线. 随着部分固定正电荷密度的增加, 表面电场

产生的新电场峰值提高, 电场调制效应增强, 使栅边缘高峰电场下降量增加, 器件达到 GaN 材料临界击穿电场时所施加的漏端电压也必须增加, 所以器件最终的击穿电压提高. 当部分固定正电荷密度增加到 $9.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 时, 电场峰值在漏端电压为 700 V 时接近 GaN 材料临界击穿电场. 图 4 为设计本文提出的新结构部分固定正电荷密度提供了科学依据. 工艺上可以通过离子注入 H^+ 并在一定温度下退火实现 Si_3N_4 钝化层的部分固定正电荷.

图 2 和图 3 所示的表面电场峰 Pk 是通过电场调制效应产生的. 为了说明具有 Si_3N_4 层部分固定电荷对 AlGaIn/GaN HEMTs 表面电场的调制, 利用仿真软件获得了沿 AlGaIn/GaN 异质结 X 方向和 Y 方向 (如图 1 所示) 的电场分布. 如图 5(a) 所示, 当漏端电压为 650 V, 即栅边缘高峰电场接近 GaN 材料临界击穿电场时, 沿器件纵向 (O - Y) 电场分布中出现明显的电场峰 $\text{Pk}_{(Y)}$, 位置在 AlGaIn 与 GaN 异质结界面. 同时, 沿器件横向 (O - X) 电场分布中也

出现明显电场峰 $\text{Pk}_{(X)}$, 这个电场峰位于部分固定正电荷在器件栅漏之间的对应位置, 如图 5(b) 所示. 横向和纵向电场分布充分说明新结构表面出现的电场峰是通过电场调制效应产生.

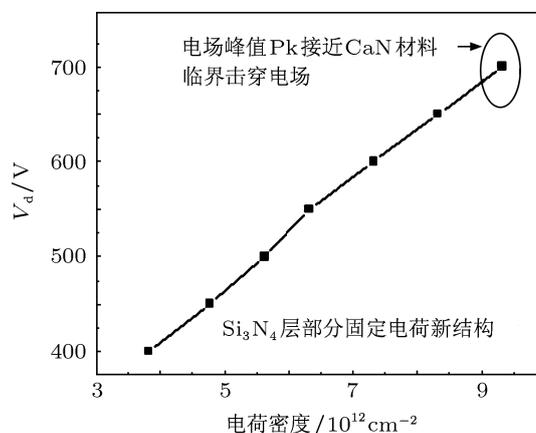


图 4 具有 Si_3N_4 层部分固定正电荷新型 AlGaIn/GaN HEMTs 电荷密度和漏端电压的关系

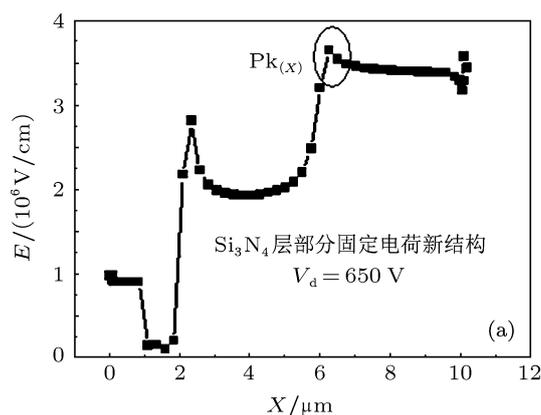
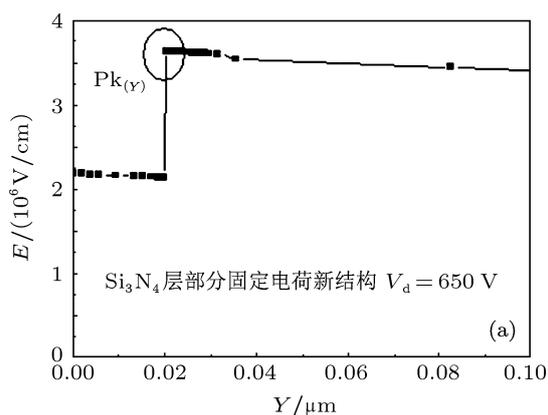


图 5 (a) 具有 Si_3N_4 层部分固定正电荷新型 AlGaIn/GaN HEMTs 沿 O - Y 方向电场分布: $V_d = 650 \text{ V}$; (b) 具有 Si_3N_4 层部分固定正电荷新型 AlGaIn/GaN HEMTs 沿 O - X 方向电场分布: $V_d = 650 \text{ V}$

图 6 所示为具有 Si_3N_4 层部分固定电荷对 Al-GaN/GaN HEMTs 和传统结构电压-电流关系曲线, 器件的阈值电压为 -2 V 左右, 并且为耗尽型. 对于本文提出的 Si_3N_4 层部分固定正电荷新结构, 由于电荷补偿效应, 在沟道感应出更高浓度的 2DEG, 器件的沟道电阻减小, 输出电流较传统结构增加.

4 结论

本文在减小 GaN 缓冲层泄漏电流基础上, 提出了一种具有 Si_3N_4 层部分固定正电荷新型 AlGaIn/GaN HEMTs 结构. 利用不影响 AlGaIn/GaN 异质结

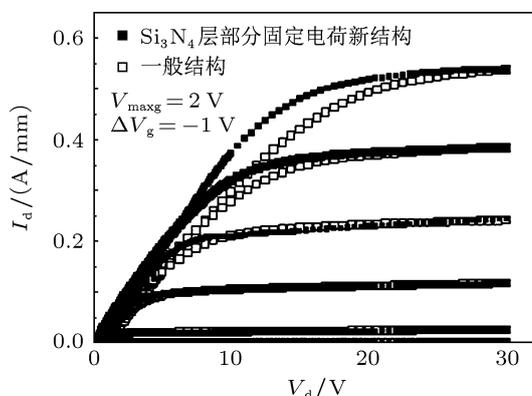


图 6 具有 Si_3N_4 层部分固定电荷新型 AlGaIn/GaN HEMTs 和传统结构 I_d - V_d 曲线

极化效应的 Si_3N_4 钝化层电荷分布, 通过电场调制效应优化了器件的表面电场. 表面电场中产生的新电场峰使栅边缘和漏端高电场有效降低, 器件达到 GaN 材料临界电场时击穿电压提高. 栅边缘电场的有效降低, 改善了器件的可靠性. 通过 Si_3N_4

与 AlGaIn 界面横、纵向电场分布, 说明了产生表面电场峰的电场调制效应, 为设计 Si_3N_4 层部分固定正电荷新结构提供了科学依据. 部分固定正电荷的补偿作用, 使沟道 2DEG 浓度增加, 导通电阻减小, 输出电流较传统结构提高.

- [1] Chu R M, Zhou Y G, Liu J, Wang D L, Chen K J, Lau K M 2005 *IEEE Transactions on Electron Devices* **52** 438
- [2] Anderson T J, Ren F, Covert L, Lin J, Pearton S J, Dalrymple T W, Bozada C, Fitch R C, Moser N, Bedford R G, Schimpf M 2006 *J. Electronic Materials* **35** 675
- [3] Corrion A L, Poblencz C, Wu F, Speck J S 2008 *J. Appl. Phys.* **130** 093529
- [4] Aubry R, Jacquet J C, Dessertenne B, Chartier E, Adam D, Cordier Y, Semond E, Massies J, Diforte M A, Romann A, Delage S L 2003 *Eur. Phys. J. AP* **22** 77
- [5] Chen X B, Johnny K O S 2001 *IEEE Transactions on Electron Devices* **48** 344
- [6] Shreepad K, Michael S S, Grigory S 2005 *Transactions on Electron Devices* **52** 2534
- [7] Wataru S, Masahiko K, Yoshiharu T 2005 *IEEE Transactions on Electron Devices* **52** 106
- [8] Duan B X, Yang Y T 2012 *Micro & Nano Lett.* **7** 9
- [9] Duan B X, Yang Y T 2012 *Sci China Inf. Sci.* **55** 473
- [10] Duan B X, Yang Y T 2012 *Chin. Phys. B* **21** 057201-1
- [11] Duan B X, Yang Y T, Zhang B, Hong X F 2009 *IEEE Electron Device Lett.* **30** 1329
- [12] Duan B X, Yang Y T, Zhang B 2009 *IEEE Electron Device Lett.* **30** 305
- [13] Duan B X, Yang Y T 2011 *IEEE Transactions on Electron Devices* **58** 2057
- [14] Duan B X, Yang Y T, Zhang B 2010 *Solid-State Electronics* **54** 685
- [15] Hidetoshi I, Daisuke S, Manabu Y, Yasuhiro U, Hisayoshi M, Tet-suzo U, Tsuyoshi T, Daisuke U 2008 *IEEE Electron Device Lett.* **29** 1087
- [16] Zhang Y F, Singh J 1999 *J. Appl. Phys.* **85** 587
- [17] Marso M, Bernat J, Javorka P, Kordos P 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 2928
- [18] Polyakov V M, Schwierz F 2005 *J. Appl. Phys.* **98** 023709
- [19] Wang W F, Derluyn J 2006 *Japanese J. Appl. Phys.* **45** L224
- [20] Parvesh G, Sujata P, Subhasis H, Mridula G, Gupta R S 2007 *Solid State Electronics* **51** 130
- [21] Heikman S, Keller S, DenBaars S P, Mishra U K 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 439
- [22] Tang H, Webb J B, Bardwell J A, Raymond S, Salzman J, Uzan S C 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 757
- [23] Katzer D S, Storm D F, Binari S C, Roussos J A, Shanabrook B V, Glaser E R 2003 *J. Cryst. Growth* **251** 481
- [24] Subramaniam A, Takashi E, Lawrence S, Hiroyasu I 2006 *Japanese J. Appl. Phys.* **45** L220
- [25] Bardwell J A, Haffouz S, McKinnon W R, Storey C, Tang H, Sproule G I, Roth D, Wang R 2007 *Electrochemical and Solid-State Lett.* **10** H46
- [26] Duan B X, Yang Y T, Kevin J C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 227302 (in Chinese) [段宝兴, 杨银堂, 陈敬 2012 物理学报 **61** 227302]

Breakdown voltage analysis of new AlGaIn/GaN high electron mobility transistor with the partial fixed charge in Si₃N₄ layer*

Duan Bao-Xing^{1)†} Yang Yin-Tang¹⁾ Kevin J. Chen²⁾

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

2) (Department of Electronic and Computer Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Clear Water Bay, Hong Kong, China)

(Received 21 June 2012; revised manuscript received 10 July 2012)

Abstract

In order to optimize the surface electric field of the traditional AlGaIn/GaN high electron mobility transistor and improve the breakdown voltage and reliability, a new AlGaIn/GaN high electron mobility transistor is proposed with the partial fixed positive charges in the Si₃N₄ passivation layer in this paper. The partial fixed positive charges of the Si₃N₄ passivation layer do not affect the polarization effect of the AlGaIn/GaN heterojunction. The surface electric field tends to the uniform distribution due to the new electric field peak formed by the partial fixed positive charges, which modulates the surface electric field by applying the electric field modulation effect. The high electric fields near the gate and drain electrode decrease due to the new electric field peak. The breakdown voltage is improved from the 296V for the traditional structure to the 650V for the new structure proposed. The reliability of the device is improved due to the uniform surface electric field. The effect of the electric field modulation is explained by the horizontal and vertical electric field distribution between the Si₃N₄ and AlGaIn interface, which provides a scientific basis for designing the new structure with the partial fixed positive charges in the Si₃N₄ layer. Because of the fixed positive charge compensation, the two-dimensional electron gas concentration increases, and the on-resistance decreases. So, the output current of the new structure increases compared with that of the traditional AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistor.

Keywords: AlGaIn/GaN, high electron mobility transistors, fixed charge, field electric modulation

PACS: 73.40.Kp, 73.40.Vz, 73.61.Ey

* Project supported by the State Key Program of National Natural Science of China (Grant No. 61234006), and the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61106076, 61006052).

† E-mail: bxduan@163.com