光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021120201

GaN基HEMT器件结构设计及其性能仿真

刘　雨[1*]，宋增才[1]，张　东[2]

（1. 华北水利水电大学 物理与电子学院，郑州 450046；2. 武汉大学 物理科学与技术学院，武汉 430072）

摘　要： 利用Silvaco TCAD器件模拟软件研究了AlGaN/GaN高电子迁移率晶体管（HEMT）器件势垒层的厚度、沟道宽长比和掺杂浓度对器件的转移特性和跨导曲线的影响。结果表明，器件势垒层厚度的变化可以调节器件的电流开关比和开启电压，实现由耗尽型器件向增强型器件的转变；沟道宽长比的改变可以调节器件的开启电压，并且随着沟道宽长比的增加，栅极电压控制量子阱中二维电子气的能力增强；势垒层适量掺杂提高了输出电流，并且使跨导的峰值增大，但过度掺杂会造成器件不易关断情况出现。

关键词： GaN；二维电子气；HEMTs；结构设计

中图分类号： TN386　**文章编号：** 1001－5868(2022)02－0337－05

Structure Design and Performance Simulation of GaN-based HEMTs

LIU Yu[1]，SONG Zengcai[1]，ZHANG Dong[2]

（1. School of Physics and Electronics，North China University of Water Resources and Electric Power，Zhengzhou 450046，CHN；2. School of Physics and Technology，Wuhan University，Wuhan 430072，CHN）

Abstract： The effects of barrier layer thickness，gate width length ratio and doping concentration on the transfer characteristics and transconductance curve of AlGaN/GaN HEMTs devices were studied by using Silvaco TCAD device simulation software. The results show that the change of barrier layer thickness can adjust the current switching ratio and threshold voltage of the device，and realize the transformation from depletion device to enhancement device. The ability of the gate voltage to control the two-dimensional electron gas in the quantum well increases with the increase of the gate width length ratio. The doping of barrier layer increases the output current and the peak value of transconductance，but the doping of too high concentration makes it difficult to turn off the device. This is of practical guiding significance for the practical preparation of GaN based HEMTs devices.

Key words： GaN；two dimensional electron gas；HEMTs；structural design

0　引言

GaN和SiC作为第三代宽禁带半导体材料，在微电子技术领域中的应用越来越广泛[1-5]。由GaN材料制成的功率型器件的主体结构是高电子迁移率晶体管（HEMT），即GaN高电子迁移率晶体管器件，是由GaN和其他半导体材料结合形成的异质结结构。本文研究的AlGaN/GaN HEMT器件是目前研究最为广泛的半导体器件[6-8]。在这种材料体系中，当AlGaN和GaN形成异质结时，为了使两材料费米能级统一，禁带宽度大的半导体内的电子会流向禁带宽度小的半导体，使得物体表面位置的势阱处产生一定量的电子沉积，而且这个势阱中还存在着由它本身极化效应所产生的电子；势阱中的电子在垂直异质结界面方向上其能量是量子化的，而在与异质结界面平行的二维平面内作自由电子运动，电子运动的这个薄层称为二维电子气（2DEG）；由于产生的正极化电荷的吸引，电子会向AlGaN/

收稿日期：2021－12－02.
基金项目：国家自然科学基金青年项目(61904054).
*通信作者：刘　雨　**E-mail：** happylsy2016@163.com

GaN 界面移动。因此 AlGaN/GaN HEMT 器件具有内部载流子浓度高、杂质分散度低、输出电流大和临界击穿电场高等优点，适用于高频及大功率场合[9-12]。

在高频条件下，当给 AlGaN/GaN HEMT 器件的栅极或者漏极施加一个高瞬态电压时，器件跨导和栅极电容会发生频散效应。当施加在器件漏极的电压超过一个限定的最高值时，器件的沟道电流会随着漏极电压值的增加而下降，从而使得器件的输出电流不能达到理想状态，这个效应叫做电流崩塌效应[13]。如果在 AlGaN/GaN HEMT 器件表面制备一层 SiO_2 钝化层，则可以有效地抑制因为瞬态栅压所引起的电流崩塌现象的发生。另外，由于 HEMT 器件栅极会出现漏电的情况，从而产生低频噪声现象。为了解决漏电问题，在金属栅极与 AlGaN 材料之间插入一层介质材料（SiO_2 或 Si_3N_4）来将这两种材料隔离起来，使得 AlGaN 势垒层中的电子全部转移到 GaN 层中，此时 AlGaN 势垒层处于完全耗尽状态，栅极漏电的情况好转，并且可以加大栅极的正负振幅[14]。

本文设计了 AlGaN/GaN/蓝宝石 HEMT 器件结构，利用 Silvaco TCAD 仿真软件研究了势垒层厚度、沟道宽长比和势垒层掺杂浓度对器件性能的影响，对实际制备 GaN 基 HEMT 器件具有重要的指导意义。

1 模型的建立

器件的相关参数及仿真设置如表 1 所示，在蓝宝石衬底上利用 MOCVD 技术依次沉积 25 nm 的 GaN 材料和 30 nm 的 AlGaN 材料，其中 Al 的组分为 30%。栅长（L_g）为 1.5 μm，栅源间距（L_{sg}）为 1.0 μm，栅漏间距（L_{sd}）为 0.65 μm。

表 1 AlGaN/GaN HEMT 器件基本结构参数

AlGaN 势垒层厚度/nm	30
GaN 沟道层厚度/nm	20
GaN 缓冲层厚度/nm	5
AlGaN 中 Al 的组分/%	30
L_{sg}/μm	1
L_g/μm	1.5
L_{gd}/μm	5

利用仿真软件 Silvaco 中的 Atlas 器件编辑器，根据所设计的上述器件模型参数建立器件结构模型，如图 1 所示。

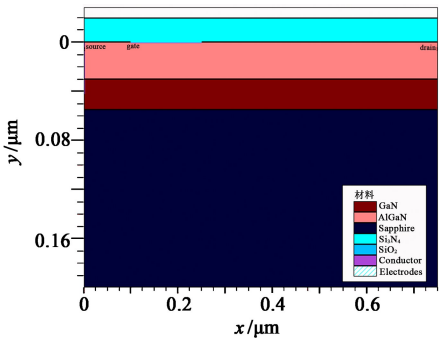


图 1 AlGaN/GaN HEMT 器件结构仿真图

无偏压时器件的静态电子浓度分布如图 2 所示。从图中可以看出，由于 AlGaN 和 GaN 两种材料的禁带宽度不同，当它们构成异质结结构时能带会发生弯曲，从而在界面处形成肖特基势垒，并且在器件自身压电极化以及自发极化效应下，所产生的电子会集中在肖特基势垒中，二维电子气由此产生，电子主要集中在 AlGaN/GaN 界面处。靠近 AlGaN/GaN 界面处电子浓度最高。随着距离两种材料界面位置的增加，电子浓度逐渐降低。在图 2 中栅极下方区域呈蓝色，说明此处电子浓度较低，原因是栅极和 AlGaN 材料形成了肖特基接触，而肖特基接触会消耗电子，所以此区域的电子浓度较低。

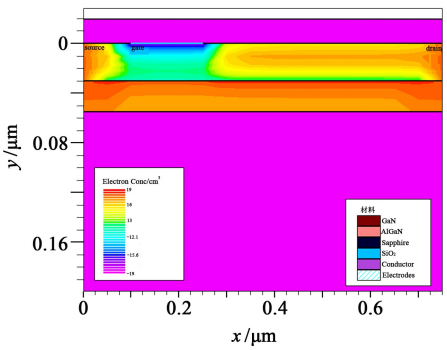


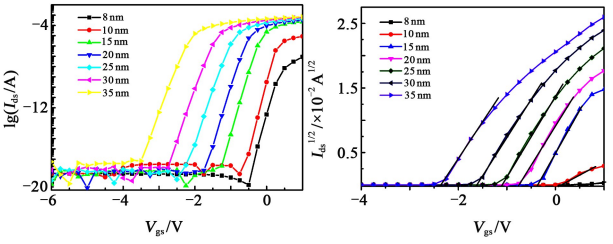
图 2 无偏压时器件的静态电子浓度分布

2 器件性能

作为器件势垒层的 AlGaN 材料，其厚度（D_d）是影响 AlGaN/GaN HEMT 器件电学特性的一个重要参数。在 AlGaN 势垒层中 Al 组分相同的情况下，薄势垒层的 AlGaN/GaN 异质结载流子浓度低，易被栅极输入的电荷耗尽，使得器件更容易获得较低的阈值电压。通过控制势垒层厚度，可以控制 HEMT 器件由耗尽型器件转变为增强型器件，从而满足不同的应用需求。

在仿真软件中模拟 AlGaN/GaN HEMT 器件

势垒层厚度分别为 8,10,15,20,25,30 和 35 nm 这七个条件下的器件特性,其转移特性如图 3 所示。随着势垒层厚度的增加,由图 3(a)可以看出,器件的电流开关比(I_{on}/I_{off})先由 3.0×10^{11} 增加到 4.1×10^{15},后降低至 1.7×10^{14};由图 3(b)所示 $I_{ds}^{1/2}$-V_{gs} 曲线得到器件的开启电压(V_{th})由 0.5 V 逐步降低至 −2.38 V。当势垒层较厚时,即使所加栅压 V_g 为 0 V,栅极与 AlGaN 材料所产生的肖特基势垒因为浓度较高的二维电子气使得器件导通。只有在所加栅源电压为负值时,所产生的二维电子气才会随所加负栅压的增大而减小,所产生的相应漏电流 I_{ds} 也下降。当势垒层厚度较薄时,肖特基势垒就足够影响到势阱中的二维电子,将电子耗尽,从而就会使二维电子气沟道关闭,当给器件栅极施加正向电压时,二维电子气沟道开通,输出电流会随所加栅极电压的增大而增大。由此得出结论,可以通过控制势垒层的厚度得到耗尽型或增强型 HEMT 器件。



(a)　I_{ds}-V_{gs} 曲线　　(b)　$I_{ds}^{1/2}$-V_{gs} 曲线

图 3　不同势垒层厚度的器件转移特性曲线

图 4 所示为不同势垒层厚度的 HEMT 器件的跨导随栅压变化的曲线图(g_m-V_{gs} 曲线),跨导 g_m 代表着栅极对导电沟道的控制能力。从仿真曲线可以看出:随着势垒层厚度的增加,跨导峰值向底栅压方向偏移;另外,随着势垒层厚度的减小,器件的跨导峰值会变小,这是因为器件势垒层变薄,栅极与沟道之间的距离变短,栅极对沟道中电子的控制能力变强。并且当势垒层宽度小于10nm时,跨导峰值开始变得很小,这说明,势垒层过薄会严重影响 g_m 的峰值,并且在往变小的方向发展。

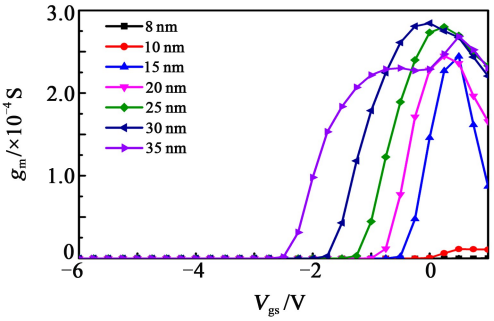
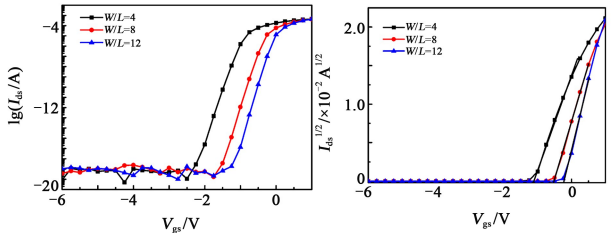


图 4　不同势垒层厚度的器件跨导随栅压变化曲线

当 AlGaN/GaN HEMT 器件势垒层厚度为 15 nm 时,研究器件沟道宽长比(W/L)分别为 4,8 和 12 时对器件性能的影响,其转移特性曲线如图 5 所示。由图 5(a)可以看出,器件的 I_{on}/I_{off} 随沟道宽长比的变化不大,均约为 10^{15};由图 5(b)所示 $I_{ds}^{1/2}$-V_{gs} 曲线得到的开启电压(V_{th})随着沟道宽长比的增大由 −1.13 V 逐步增大至 −0.25 V。这是因为器件的反馈电容,即栅漏电容(C_{gd})和栅源电容(C_{gs})的值会随着沟道宽长比的增加而增大。表明随着沟道宽长比的增加,栅极电压控制量子阱中二维电子气的能力增强。



(a)　I_{ds}-V_{gs} 曲线　　(b)　$I_{ds}^{1/2}$-V_{gs} 曲线

图 5　不同栅极宽长比的器件转移特性曲线

图 6 所示为不同沟道宽长比的 HEMT 器件的跨导随栅压变化的曲线图(g_m-V_{gs} 曲线),随着 W/L 值的增大,跨导曲线逐渐上移,并向右侧移动,说明随着沟道宽长比的增大,栅极对导电沟道电子的控制作用增强。

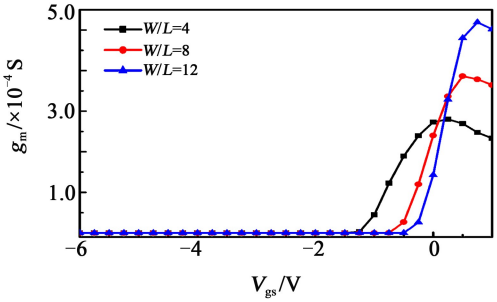
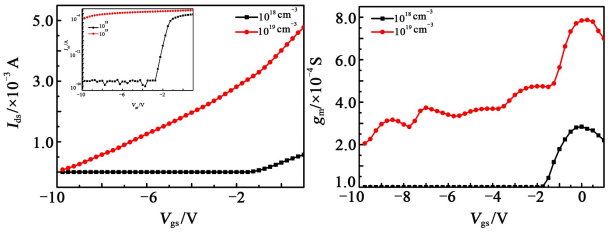


图 6　不同沟道宽长比的器件跨导随栅压变化曲线

AlGaN 势垒层的掺杂浓度 N_d 是量子阱中二维电子气电子的来源。因此在势垒层厚度不变以及栅长固定的情况下,势垒层掺杂的 n 型杂质浓度越高,进入势垒层的电子就越多,量子阱中二维电子气的密度越大,使得二维电子气的传输沟道电阻变小,器件的输出电流越大,但过高的掺杂浓度会使得器件因电流过大而无法正常关断。当器件的 AlGaN 势垒层厚度为 30 nm,GaN 沟道层厚度为 20 nm,

AlGaN 缓冲层厚度为 5 nm，沟道宽长比 $W/L=12$，势垒层掺杂浓度分别为 10^{18} cm^{-3} 和 10^{19} cm^{-3} 时，其转移特性曲线如图 7 所示，可以看出，掺杂浓度越高，器件的输出电流越大，当栅源电压为 1 V 时，掺杂浓度为 10^{19} cm^{-3} 的器件比掺杂浓度为 10^{18} cm^{-3} 的器件的漏源电流提升了近十倍。然而，掺杂浓度过高却导致器件无法关断，如图 7(a)插图所示。图 7(b)展示了不同势垒层掺杂浓度器件的跨导随栅压的变化曲线，当势垒层中掺杂的杂质浓度升高时，由于势垒层为二维电子气提供了电子，二维电子气中的电子浓度变高，使栅极对沟道中电子的控制能力增强，从而跨导峰值会随着浓度的增大而增大，跨导曲线随着势垒层掺杂浓度的增加而上移。



(a) 转移特性曲线 (b) 跨导随栅压变化曲线

图 7 不同势垒层掺杂浓度器件的两种不同曲线

3 总结

本文利用 Atlas 器件编辑器优化了 AlGaN/GaN HEMT 的器件结构并对其电学特性进行了模拟。结果表明，AlGaN 势垒层厚度的改变可以改变器件的开关比、输出电流和开启电压。因此，通过控制势垒层的厚度可以得到耗尽型或增强型 HEMT 器件。沟道宽长比的改变可以调节器件的开启电压，并且随着沟道宽长比的增加，栅极电压控制量子阱中二维电子气的能力增强。势垒层适量掺杂提高了输出电流，并且使跨导的峰值增大，但过高的掺杂使器件不易关断。这对实际制备 GaN 基 HEMT 器件具有一定的指导意义。

参考文献：

[1] Liang F, Zhao D, Liu Z, et al. GaN-based blue laser diode with 6.0 W of output power under continuous-wave operation at room temperature[J]. J. Semicon., 2021, 42: 112801.

[2] 张 敏，金浩妮，万 飞，等. 基于氮化该单晶的垂直 p-i-n 二极管性能研究[J]. 半导体光电，2021，42(5)：620-623.
Zhang M, Jin H N, Wan F, et al. Study on vertical GaN p-i-n diode based on free-standing GaN substrates[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(5): 620-623.

[3] Chen W C, Niu J S, Liu I P, et al. Hydrogen sensing properties of a GaN/AlGaN-based Schottky diode with acatalytic platinum (Pt) hybrid structure[J]. Sensors and Actuators B: Chem., 2021, 331: 129320.

[4] Liu Q, Pu H B, Wang X. Ultra-high voltage 4H-SiC gate turn-off thyristor for low switching time[J]. Chin. Phys. B, 2019, 28(12): 127201.

[5] Juri R R, Hansen J L, Kristen P K, et al. Optical characterization of SiC films grown on Si(111)[J]. Appl. Phys. B, 2018, 124: 230.

[6] Kim K, Kim T J, Zhang H, et al. AlGaN/GaN Schottky-gate HEMTs with UV/O_3-treated gate interface [J]. IEEE Electron. Device Lett., 2020, 41(10): 1488-1491.

[7] 刘乃漳，张雪冰，姚若河. AlGaN/GaN 高电子迁移率器件外部边缘电容的物理模型[J]. 物理学报，2020，69(7)：077302.
Liu N Z, Zhang X B, Yao R H. The physics-based model of AlGaN/GaN high electron mobility transistor outer fringing capacitances[J]. Acta Phys. Sin., 2020, 69(7): 077302.

[8] 韩 军，赵佳豪，赵 杰，等. 界面处理对 AlGaN/GaN MIS-HEMTs 器件动态特性的影响[J]. 发光学报，2019，40(7)：915-921.
Han J, Zhao J H, Zhao J, et al. Impact of interface treatment on dynamic characteristic of AlGaN/GaN MIS-HEMTs[J]. Chinese J. Lumin., 2019, 40(7): 915-921.

[9] Ding X Z, Miao B, Gu Z, et al. Highly sensitive extended gate-AlGaN/GaN high electron mobility transistor for bioassay applications[J]. RSC Adv., 2017, 7: 55835-55838.

[10] Chen L, Wang H, Hou B, et al. Hetero-integration of quasi two-dimensional $PbZr_{0.2}Ti_{0.8}O_3$ on AlGaN/GaN HEMT and non-volatile modulation of two-dimensional electron gas[J]. Appl. Phys. Lett., 2019, 115: 193505.

[11] Nguyen H Q, Nguyen T. Piezotronic effect in a normally off p-GaN/AlGaN/GaN HEMT toward highly sensitive pressure sensor[J]. Appl. Phys. Lett., 2021, 118: 242104.

[12] He X, Zhao D, Liu W, et al. Effect of GaN buffer polarization on electron distribution of AlGaN/GaN heterostructure[J]. J. Alloy. Compd., 2016, 670: 258-261.

[13] 付兴中，赵金霞，崔玉兴，等. AlGaN/GaN HEMT 器件结构退化影响因素的研究现状[J]. 半导体技术，2016，41(3)：161-168，197.
Fu X Z, Zhao J X, Cui Y X, et al. Study state of the influence factors for structural degradation of AlGaN/GaN HEMTs[J]. Semicond. Technol., 2016, 41(3): 161-168, 197.

[14] Shrestha N M, Wang Y Y, Li Y, et al. A novel AlGaN/GaN multiple aperture vertical high electron mobility transistor with silicon oxide current blocking layer [J]. Vacuum, 2015, 118: 59-63.

作者简介：

刘 雨(1988—)，女，河南省开封市人，博士，讲师，主要从事半导体光电器件方面的研究。