

引用格式: 李佳, 陈万军, 孙瑞泽, 等. 一种降低 GaN HEMT 沟道温度的新结构[J]. 微电子学与计算机, 2020, 37(8): 27-31.
[LI J, CHEN W J, SUN R Z, et al. A new structure for reducing the channel temperature of GaN HEMT[J]. Microelectronics & Computer, 2020, 37(8): 27-31.]

一种降低 GaN HEMT 沟道温度的新结构

李 佳, 陈万军, 孙瑞泽, 信亚杰

(电子科技大学 电子科学与工程学院, 四川 成都 610054)

摘 要: 针对氮化镓高电子迁移率晶体管(GaN HEMT)沟道温度过高导致器件性能下降的问题, 提出一种降低 GaN HEMT 沟道温度的新结构, 通过优化沟道电场来降低沟道温度. 该结构采用混合势垒层设计, 将栅极下方的势垒层分为两层, 上层采用 AlN, 下层采用重掺杂的 AlGaIn; 此外, 该结构还使用场板; 为了更好的散热, 该结构采用热导率更高的 AlN 代替传统的 Si₃N₄ 作为器件的钝化层. 场板和混合势垒层有利于改善沟道电场, 降低器件沟道温度. 仿真结果表明, 相比于传统结构, 新结构的沟道温度分布更加均匀, 温度峰值下降 47 K. 此外, 新结构的击穿电压提高 50%, 输出特性也得到了改善.

关键词: 氮化镓(GaN); 高电子迁移率晶体管(HEMT); 沟道温度; 混合势垒层

中图分类号: TN386

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2020)08-0027-05

A new structure for reducing the channel temperature of GaN HEMT

LI Jia, CHEN Wan-jun, SUN Rui-ze, XIN Ya-jie

(School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: When the channel temperature of GaN high electron mobility transistor (GaN HEMT) is too high, the performance of the device is degraded. To solve this problem, a new structure is proposed, the channel temperature is reduced by optimizing the electric field. The barrier layer under the new structure gate is called the mixed barrier layer, which consists of two layers, the upper layer is AlN and the lower layer is heavily doped AlGaIn. In addition, the field plate is also introduced to change the channel electric field. For better heat dissipation, the passivation layer material of the new structure is AlN instead of Si₃N₄, because it has a higher thermal conductivity. Compared with the traditional structure, the channel temperature distribution of the new structure is more uniform, and the channel temperature peak drops by 47K. In addition, the breakdown voltage of the new structure is increased by 50%, and the output characteristics are also improved.

Key words: gallium nitride (GaN); high electron mobility transistor (HEMT); channel temperature; mixed barrier layer

1 引言

与传统 Si 器件相比, GaN 高电子迁移率晶体管

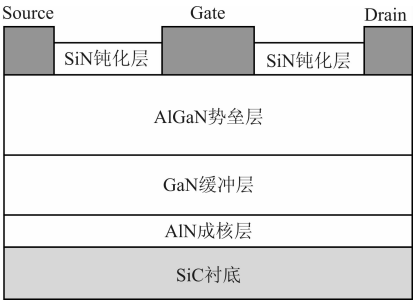
(HEMT)具有高电流密度、快开关速度和低导通电阻等优点^[1-2]. 但当 GaN 工作时, 内部电场尖峰会导致沟道温度升高, 引发自热效应^[3], 降低器件性能和寿命. 目前降低 GaN HEMT 沟道温度的常用方法

是在器件上生长一层金刚石^[4]或用倒封装技术^[5]来加快散热. 但上述方案不仅散热效果有限, 而且会增大器件体积, 不利于小型化和集成化.

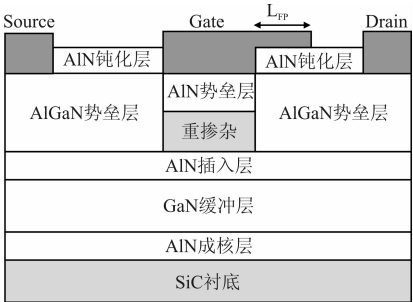
本文针对以上问题, 提出了一款 GaN HEMT 新结构, 该结构通过改善器件内部电场来降低器件沟道温度, 并提高器件性能.

2 仿真结构参数

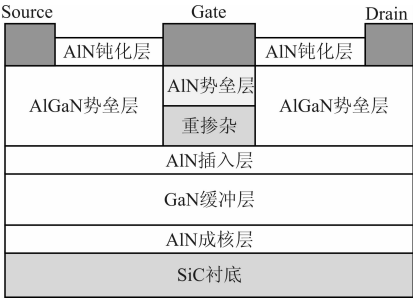
利用 Senteurus 仿真软件建立器件模型, 其二维结构如图 1 所示. 图 1(a) 所示是传统的 GaN HEMT 器件结构, 传统结构采用 Si₃N₄ 材料作为钝化层, 以抑制电流崩塌效应^[6].



(a) 传统 GaN HEMT 结构



(b) 本文所提新结构



(c) 不含场板的新结构

图 1 器件的二维结构

图 1(b) 是本文所提出新结构, 相比于传统结构单一的 AlGaIn 势垒层, 新结构采用 AlN + AlGaIn 混合势垒层, 并使用场板, 以改善器件的沟道电场,

降低沟道温度. 另外, 新结构采用导热性能良好的 AlN^[7]代替传统的 Si₃N₄ 作为钝化层材料, 以加快散热. 为避免混合势垒中 AlGaIn 变薄带来的二维电子气浓度降低的问题, 新结构混合势垒中的 AlGaIn 采用重掺杂, 掺杂浓度为 (1e19 cm⁻³), 并根据参考文献^[8], 采用 AlN 插入层来维持二维电子气浓度, 以获得较好的输出特性. 与传统结构相比, 新结构沟道温度分布更加均匀, 峰值温度下降幅度明显, 击穿电压和饱和输出电流也更高. 另外, 为突出新结构中混合势垒层的作用, 图 1(c) 还展示了不含场板的新结构.

以上结构栅源间距、栅漏间距均为 0.7 μm, 栅极宽度 0.2 μm, 考虑到 AlGaIn 势垒层厚度对沟道电子迁移率的影响, 势垒层总厚度设为 16 nm. 新结构中, 场板长度 L_{FP} 最佳长度为 0.3 μm, 场板介质层厚度为 35 nm, AlN 势垒层最佳厚度为 6 nm. 另外, 以上结构均采用碳化硅 (SiC) 作为衬底材料, 并在 SiC 衬底与 GaN 缓冲层之间生长一层 AlN 成核层, 以减少晶格失配^[9].

3 仿真结果与讨论

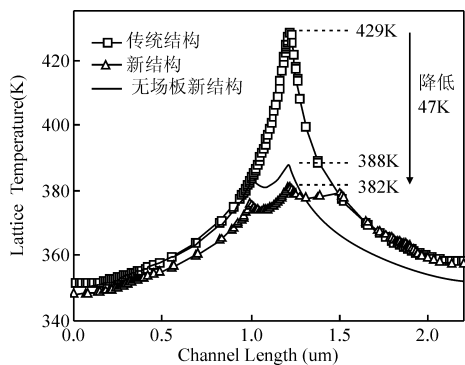
3.1 沟道温度与沟道电场

图 2 绘制了器件的沟道温度和沟道电场的分布曲线. 图 2(a) 所示是新结构和传统结构的沟道温度分布情况, 从图中可以看出, 传统器件的温度峰值为 429 K, 温度尖峰位置出现在栅极漏侧, 作为对比, 新结构栅极漏侧的温度峰值仅为 382 K, 较传统结构下降 47 K. 另外, 新结构在栅极源侧和场板末端也出现了温度峰值, 但都比栅极漏侧峰值低.

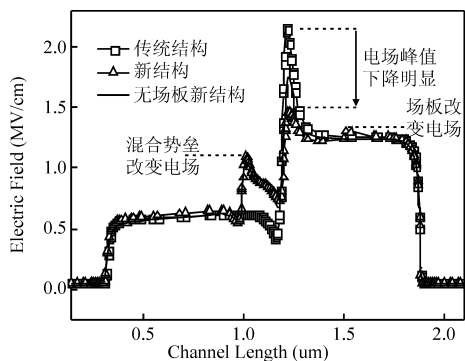
为便于比较, 不含场板的新结构沟道温度分布也绘制在了图 2(a) 中, 去掉场板后, 器件温度峰值为 388 K, 比有场板时略高, 场板末端温度峰消失, 但栅极源侧仍存在温度峰, 对图 2(a) 分析可以得出, 栅极源侧的温度峰值是由混合势垒层导致的.

图 2(b) 展示了新结构与传统结构的沟道电场分布情况, 仿真结果显示, 传统结构沟道最大电场出现在栅极漏侧, 峰值为 2.2 MV/cm, 而新结构在该处的最大峰值仅为 1.4 MV/cm. 另外, 新结构在栅极源侧和场板末端也出现了电场峰, 峰值分别是 1.1 MV/cm 和 1.3 MV/cm. 这说明, 相对于传统结构, 新结构改变了 GaN HEMT 沟道电场, 使电场分布更加均匀, 电场最大值也变得更低.

为体现混合势垒层的作用, 图 2(b) 还绘制了去掉场板的新结构沟道电场分布情况, 从图中可知, 其



(a) 沟道温度分布图



(b) 沟道电场分布图

图 2 沟道温度和沟道电场分布曲线

最大电场仍出现在栅极漏侧,峰值温度约为 1.8 MV/cm,场板处电场峰消失,栅极源侧电场峰值约为 1.1 MV/cm,这说明,新结构中栅极源侧的电场峰值也是由混合势垒层导致的。

从图 2 可以看出,器件的沟道温度峰值和沟道电场峰值出现的位置是一样的,这主要是由于在电场峰值所在处,强电场会使沟道载流子加速,高速的沟道载流子会不断发生碰撞,并把能量传递给晶格,引起局部晶格温度升高,最后形成稳定的热分布。

而相比于传统结构,新结构沟道电场分布更均匀,电场峰值降低,峰值电场对沟道载流子的加速作用减弱,进而导致该处温度降低。另一方面,导热性能良好的 AlN 钝化层也有利于器件的散热。但沟道温度降低最主要的原因还是源于对器件结构的改进。

3.2 器件电学特性分析

为研究结构改变对器件电学性能的影响,图 3 绘制了器件的电学特性曲线。图 3(a)是新结构和传统结构击穿电压对比图,从图 3(a)可以看出,传统器件的击穿电压为 115 V(击穿电压判断标准 $10 \mu\text{A} \cdot \text{mm}$)^[10],而新结构的击穿电压为 170 V,提高

近 50%。为作对比,图 3(a)还绘制了去掉场板的新结构击穿曲线,其击穿电压值为 131 V,较有场板时略低。结合图 3(a)分析可以得出,混合势垒层和场板的使用,导致了电场峰值的降低,这不仅有利于改善沟道温度,也有利于提高器件的击穿电压。

图 3(b)是新结构与传统结构的输出特性对比图,图中栅极电压为 0 V。由图 3(b)可以看出,当漏源电压增大到一定值时,器件的 I-V 特性在饱和区会出现下降趋势,这就是所谓的负阻现象^[3],该现象是由器件温度升高引起的自热效应导致的。与传统结构相比,新结构虽然也出现了负阻现象,但其斜率绝对值小于传统结构,且饱和电流更大,这说明新结构改善了器件的输出特性。从图 3(b)中还可以看出,新结构去掉场板之后,负阻效应更明显,但饱和电流绝对值变得更高了,这是由于场板的使用改变了沟道电子迁移率导致的。

二维电子气浓度是 GaN HEMT 器件漏极电流的决定因素,二维电子气浓度与漏极电流的关系可用公式(1)表示^[11]。

$$I = Q_s(x)Zv(x) \quad (1)$$

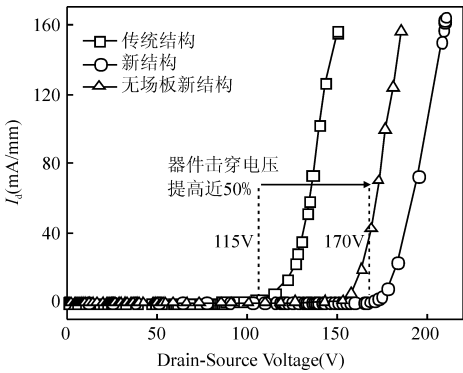
式中, $Q_s(x)$ 是二维电子气电荷; Z 是栅极宽度; $v(x)$ 是电子迁移速度。

相比于传统器件结构,新结构虽然减薄了漏极下方 AlGaIn 势垒层的厚度而用 AlN 代替,但对混合势垒层中的 AlGaIn 采用了重掺杂,在该区域增加了二维电子气浓度,从而增加了漏极电流。虽然沟道电场的降低会影响电子迁移速度,但掺杂浓度的提高和 AlN 插入层^[8]的使用使二维电子气浓度得以提高,进而使输出特性也得以改善。值得一提的是,出于器件可靠性和抑制器件电流崩塌^[12]的考虑,新结构只对栅极下方的 AlGaIn 进行了重掺杂。

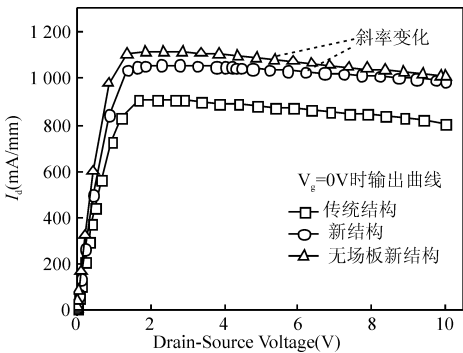
3.3 器件结构参数对性能的影响

图 4 探究了场板长度对器件的影响情况,图 4(a)绘制了 GaN HEMT 沟道温度随场板长度变化的曲线,从图 4(a)中可以看出,随着场板长度的增加,GaN HEMT 沟道最大温度先减小后增加,温度最高值出现的位置由栅极漏侧逐渐转移到场板末端,在新结构中,当场板长度达到 $4 \mu\text{m}$ 左右时,场板末端温度超过栅极漏侧峰值,此时再增加场板长度已不利于降低 GaN HEMT 器件沟道温度。

图 4(b)展示了场板长度变化时,GaN HEMT 最大输出电流和电子迁移率的变化情况,从图 4(b)中可以看出,场板的使用虽然可以改善沟道电场,但也会降低器件的电子迁移率,进而降低 GaN

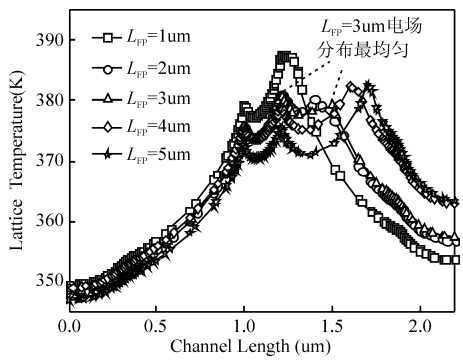


(a) 击穿电压对比图

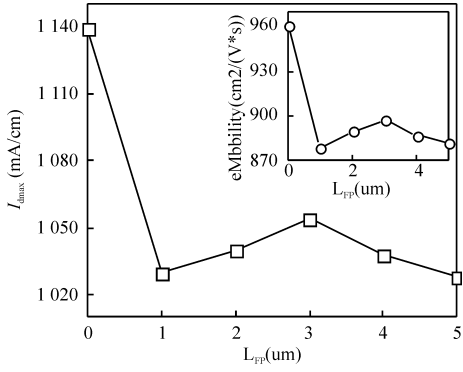


(b) 输出特性对比图

图 3 器件电学特性曲线



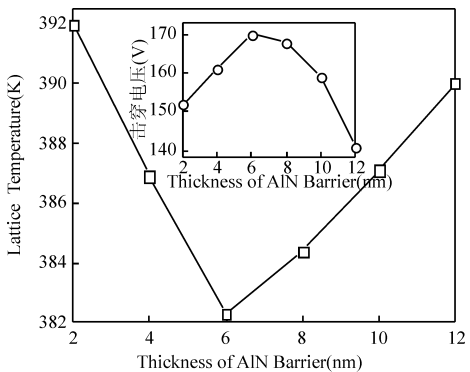
(a) 场板长度对沟道温度的影响



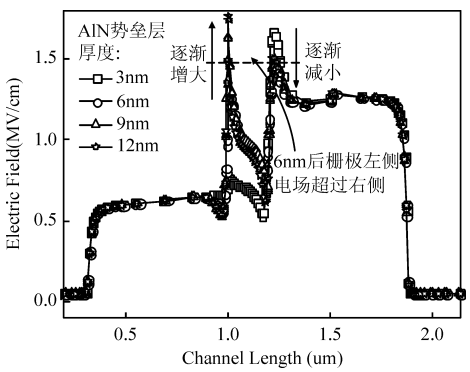
(b) 场板长度对最大输出电流和电子迁移率的影响

图 4 场板长度对器件的影响

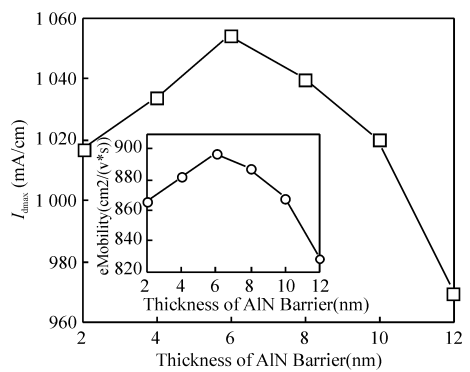
HEMT 器件的最大输出电流. 而改变场板的长度, 在改变沟道电场的同时, 也会改变电子迁移率. 当场板长度为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 时, 沟道温度分布更加均匀, 此时的电子迁移率和最大输出电流也是最大的. 因此, 结合图 4 可以得出, 当综合考虑 GaN HEMT 的温度场和输出特性时, 新结构中场板最佳长度约为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 左右. 另外, 出于对沟道电场的优化考虑^[13], 所设计新结构场板介质层厚度为 35 nm .



(a) AlN 势垒层厚度对最高温度和击穿电压的影响



(b) AlN 势垒层厚度对沟道电场的影响



(c) AlN 势垒层厚度对最大输出电流和电子迁移率的影响

图 5 AlN 势垒层厚度对器件的影响

图 5 探究了新结构 AlN 势垒层厚度对器件特性的影响. 图 5(a)绘制了新结构沟道最大温度和击穿电压随 AlN 势垒层厚度变化情况. 从图 5(a)中可

以看出,随着 AlN 势垒层厚度增加,沟道最高温度逐渐降低,在 6 nm 时达到最低值 382 K,此后沟道温度又随 AlN 势垒层增加而逐渐上升. 耐压方面,随着 AlN 势垒层厚度增加,GaN HEMT 的击穿电压逐渐上升,当 AlN 势垒层厚度为 6 nm 时,器件击穿电压达到最大值 170 V,此后击穿电压随 AlN 势垒层厚度增加逐渐下降.

为解释上述现象,图 5(b)绘制了新结构 AlN 势垒层厚度变化时,沟道电场的变化情况,从图中可以看出,随着 AlN 势垒层厚度的增加,栅极源侧的沟道电场逐渐增加,而栅极漏侧的沟道电场则逐渐降低,当 AlN 势垒层厚度为 6 nm 时,沟道电场分布最为均匀,此后随 AlN 势垒层厚度增加,栅极源侧的电场峰值逐渐超过栅极漏侧,沟道最大电场逐渐变高,再增大 AlN 势垒层厚度已不利于进一步改善沟道电场分布.

图 5(c)还研究了最大漏极电流和电子迁移率随 AlN 势垒层厚度变化情况,从图中可知,当 AlN 势垒层厚度逐渐增加时,器件最大漏极电流(输出电流)逐渐增加,电子迁移率也逐渐提高,到 6 nm 时达到一个峰值,此后,随 AlN 势垒层进一步增加,器件最大漏极电流和电子迁移率都逐渐降低.

从图 5 中可以得出,新结构中 AlN 势垒层厚度的变化会导致器件的电场发生改变,进而影响沟道温度和器件耐压,另外,电场的改变也会影响电子迁移率,进而影响器件输出特性. 当综合考虑新结构的温度分布和电学特性时,新结构中 AlN 势垒层最佳厚度约为 6 nm 左右.

4 结束语

针对传统 GaN HEMT 器件存在的沟道温度较高的问题,提出了一款降低 GaN HEMT 沟道温度的新结构. 该结构采用混合势垒层设计并使用场板来改变器件电场分布,进而降低器件沟道温度. 与传统结构相比,新结构的沟道温度分布更加均匀,温度峰值降低 47 K,降温效果显著. 另外,新结构击穿电压提升约 50%,输出特性也得到了改善.

参考文献:

[1] ROCCAFORTE F, FIORENZA P, GRECO G, et al. Emerging trends in wide band gap semiconductors (SiC and GaN) technology for power devices[J]. *Microelectronic Engineering*, 2018, 187-188(5): 66-67.

[2] SHI Y J, CHEN W J, CUI X T, et al. Investigation on the Long-Term Reliability of High-Voltage p-GaN HEMT by Repetitively Transient Overcurrent[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, 65(12): 5322-5328.

[3] CHEN X S, BOUMAIZA S, WEI L, et al. Self-Heating and Equivalent Channel Temperature in Short Gate Length GaN HEMTs[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2019, 66(9): 3748-3755.

[4] ZHOU Y, RAMANETI R, ANAYA J, et al. Thermal characterization of polycrystalline diamond thin film heat spreaders grown on GaN HEMTs[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(4): 1901-1905.

[5] JIANG S, LEE K B, GUINEY I, et al. Al-GaN-Integrated Cascode Heterojunction Field Effect Transistors[J]. *IEEE Transactions on Power Devices*, 2017, 32(11): 8743-8750.

[6] LUO B, MEHANDRU R, KIM J, et al. Comparison of Surface Passivation Films for Reduction of Current Collapse in AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2002, 149(11): 613-619.

[7] HUANG S, JIANG Q M, YANG S, et al. Effective Passivation of AlGaIn/GaN HEMTs by ALD-Grown AlN Thin Film[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2012, 33(4): 516-518.

[8] ELLER B S, YANG J L, ROBERT J, et al. Polarization Effects of GaN and AlGaIn: Polarization Bound Charge, Band Bending, and Electronic Surface States[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2014, 43(12): 4560-4568.

[9] WALTEREIT P, BRANDT B, TRAMPERT A, et al. Influence of AlN nucleation layers on growth mode and strain relief of GaN grown on 6H - SiC(0001)[J]. *Applied Physics Letters*, 1999, 74(24): 3660-3662.

[10] ZHAO S L. Study on the breakdown mechanism of gallium nitride-based semiconductor power electronic devices[D]. Xi'an: Xidian University, 2015.

[11] DELAGEBEAUDEUF D, LINH N T. Metal-(n) AlGaAs-GaAs two-dimensional electron gas FET[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1982, 29(6): 955-960.

[12] RAWAL D S, AMIT D, SHARMA S, et al. Current collapse scaling in GaN/AlGaIn/SiC high electron mobility transistors[J]. *Solid State Electronics Letters*, 2019, 1(1): 30-37.