

GaN 高电子迁移率晶体管强电磁脉冲损伤效应与机理

刘阳 柴常春 于新海 樊庆扬 杨银堂 席晓文 刘胜北

Damage effects and mechanism of the GaN high electron mobility transistor caused by high electro-magnetic pulse

Liu Yang Chai Chang-Chun Yu Xin-Hai Fan Qing-Yang Yang Yin-Tang Xi Xiao-Wen Liu Sheng-Bei

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 038402 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.038402

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.038402>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I3>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

内嵌 CuO 薄膜对并五苯薄膜晶体管性能的改善

[Analysis of improved characteristics of pentacene thin-film transistor with an embedded copper oxide layer](#)

物理学报.2015, 64(22): 228502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.228502>

溶胶凝胶法制备以 HfO<sub>2</sub> 为绝缘层和 ZITO 为有源层的高迁移率薄膜晶体管

[High mobility thin-film transistor with solution-processed hafnium-oxide dielectric and zinc-indium-tin-oxide semiconductor](#)

物理学报.2015, 64(16): 168501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.168501>

质子辐射损伤对单结 GaAs/Ge 太阳能电池暗特性参数的影响

[Effect of irradiation damage on the dark electric properties of single junction GaAs/Ge solar cells](#)

物理学报.2014, 63(18): 188101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.188101>

CO<sub>2</sub> 激光光栅式扫描修复熔石英表面缺陷的实验研究与数值模拟

[Experimental investigation and numerical simulation of defect elimination by CO<sub>2</sub> laser raster scanning on fused silica](#)

物理学报.2014, 63(6): 068105 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.068105>

位移损伤剂量法评估空间 GaAs/Ge 太阳能电池辐照损伤过程

[Radiation damage of space GaAs/Ge solar cells evaluated by displacement damage dose](#)

物理学报.2011, 60(9): 098110 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.098110>

# GaN高电子迁移率晶体管强电磁脉冲 损伤效应与机理\*

刘阳<sup>1)†</sup> 柴常春<sup>1)</sup> 于新海<sup>1)</sup> 樊庆扬<sup>1)</sup> 杨银堂<sup>1)</sup> 席晓文<sup>1)</sup> 刘胜北<sup>2)</sup>

1)(西安电子科技大学微电子学院, 教育部宽禁带半导体材料与器件重点实验室, 西安 710071)

2)(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

(2015年9月20日收到; 2015年11月10日收到修改稿)

提出了一种新型 GaN 异质结高电子迁移率晶体管在强电磁脉冲下的二维电热模型, 模型引入材料固有的极化效应, 高场下电子迁移率退化、载流子雪崩产生效应以及器件自热效应, 分析了栅极注入强电磁脉冲情况下器件内部的瞬态响应, 对其损伤机理和损伤阈值变化规律进行了研究. 结果表明, 器件内部温升速率呈现出“快速-缓慢-急剧”的趋势. 当器件局部温度足够高时 ( $\geq 2000$  K), 该位置热电子发射与温度升高形成正反馈, 导致温度急剧升高直至烧毁. 栅极靠近源端的柱面处是由于热积累最易发生熔融烧毁的部位, 严重影响器件的特性和可靠性. 随着脉宽的增加, 损伤功率阈值迅速减小而损伤能量阈值逐渐增大. 通过数据拟合得到脉宽  $\tau$  与损伤功率阈值  $P$  和损伤能量阈值  $E$  的关系.

**关键词:** GaN, 高电子迁移率晶体管, 强电磁脉冲, 损伤机理

**PACS:** 84.40.-x, 85.30.Tv

**DOI:** 10.7498/aps.65.038402

## 1 引言

随着脉冲功率技术的发展, 雷达和无线通信系统的广泛使用及高功率微波武器的出现使得电子系统面临的电磁环境日益恶化. 1999年2月, 在瑞士苏黎世召开的EMC研究小组会上定义了有意电磁干扰(intentional electromagnetic interference, IEMI): 以恐怖主义或者犯罪为目的, 恶意制造电磁能量, 将噪声或信号引入电气和电子系统内部, 对其进行扰乱、中断或毁伤<sup>[1]</sup>. 随着电子系统的尺寸的不断缩小、系统集成度的不断提高以及工作电压和功耗的不断降低, 电磁系统对外界的敏感度越来越高, 损伤阈值越来越低. 因此研究电磁脉冲(electromagnetic pulse, EMP)对半导体的干扰和损伤效应机理具有十分重要的现实意义.

Wunsch和Bell<sup>[2]</sup>基于一维的简单热失效模型得到了与实验数据相符合的损伤功率与脉宽的半

经验公式. 文献[3—6]开展了一系列互补金属氧化物半导体(CMOS)反相器在高功率微波(HPM)干扰效应与机理的实验研究. Chahine等<sup>[7]</sup>建立了测量IC的RF注入干扰阈值的标准实验装置. 笔者所在课题组对EMP注入下的双极结型晶体管, CMOS, PIN及GaAs高电子迁移率晶体管(HEMT)器件均做了相关研究. 文献[8—13]研究了双极型晶体管在强电磁脉冲注入下的毁伤机理、烧毁时间与注入电压幅度的关系及烧毁能量与脉宽的关系. 文献[14, 15]分析了CMOS反相器在HPM注入下的闩锁效应对温度及频率的敏感度. 文献[16, 17]分析了AlGaAs/InGaAs HEMT毁伤机理, 研究了脉宽与毁伤功率阈值及能量阈值的关系. 文献[18]研究了PIN限幅器中电流丝的运动, 讨论了不同峰值功率的电磁脉冲作用下限幅器的输入/输出特性, 以及大功率电磁脉冲注入PIN器件热损伤阈值与脉宽的关系.

\* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2014CB339900)和中国工程物理研究院复杂电磁环境科学与技术重点实验室开放基金(批准号: 2015-0214.XY.K)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [liu\\_yang@163.com](mailto:liu_yang@163.com)

随着半导体产业的快速发展, 第三代半导体材料 GaN 的生长技术不断提高, GaN HEMT 借助其高工作频率、低噪声、高效率及高线性度等优势已经越来越广泛地运用在军事及民用领域. 由于材料的极化效应以及二维电子气沟道的存在, GaN HEMT 与双极型器件、PIN 器件以及 GaAs HEMT 毁伤机理有所不同. 但是到目前为止, 其在 EMP 下的损伤机理却鲜有研究. 因此, GaN 高电子迁移率晶体管作为具有应用前景的微波器件, 研究其在强电磁脉冲作用下的损伤机理十分必要.

在射频电子系统接收机前端, 大部分晶体管采用共源极接法. 在共源极接法中, 信号从栅极输入从漏极输出. 强电磁脉冲极易从“前门”通道耦合, 从栅极进入电路, 对其进行干扰和破坏. 因此, 本文使用上升沿为 1 ns 的阶跃脉冲从栅极注入. 由于 GaN 较 AlGaIn 熔点低, 其熔点为 2500 K<sup>[19]</sup>, 因此, 当峰值温度上升到 2500 K 时判定器件因为局部熔融而烧毁.

## 2 器件结构

仿真采用典型的 AlGaIn/GaN 异质结场效应晶体管结构, 如图 1 所示. 使用 Si 衬底, 厚度为 15  $\mu\text{m}$ . 图 1 从下到上依次为 GaN 沟道层、AlGaIn 势垒层以及钝化层, 其厚度分别为 3, 0.02, 0.05  $\mu\text{m}$ . 栅源、栅漏距离分别为 1.5 和 5.0  $\mu\text{m}$ . AlGaIn 势垒层均匀掺杂  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  的 N 型杂质. 由于 GaN 外延生长过程中会产生一部分氧原子或氮原子空位, 使得 GaN bulk 显示出轻微的 N 掺杂特性<sup>[20]</sup>. 本文中利用  $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  轻 N 型杂质掺杂来模拟此效应. 为防止 GaN 沟道区漏电, GaN bulk 区域引入受主陷阱. 为制造欧姆接触, 源、漏分别掺杂  $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  的 N 型杂质. 衬底下表面与 300 K 理想热沉相连.

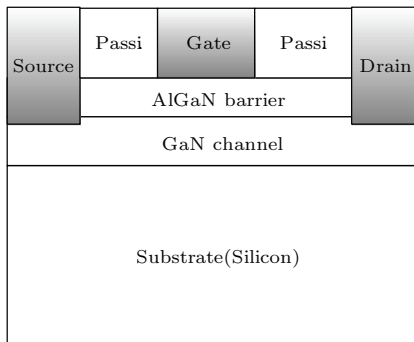


图 1 AlGaIn/GaN HEMT 结构示意图

Fig. 1. Device structure of AlGaIn/GaN HEMT.

## 3 数值模型

本文利用 Sentaurus-TCAD 模拟 EMP 作用下 GaN HEMT 的烧毁过程. 采用热动力学模型模拟载流子的输运过程, 模型考虑了温度梯度对电流密度的贡献, 此时电子和空穴电流密度方程为

$$\mathbf{J}_n = -nq\mu_n(\nabla\Phi_n + P_n\nabla T), \quad (1)$$

$$\mathbf{J}_p = -nq\mu_p(\nabla\Phi_p + P_p\nabla T), \quad (2)$$

式中,  $n$  和  $p$  分别代表电子和空穴浓度,  $\mu_n$  和  $\mu_p$  分别代表电子和空穴的迁移率.

HEMT 器件依靠 AlGaIn/GaN 界面处极化效应产生的固定正电荷吸引自由电子构成导电通道, 借助异质结界面形成的量子阱使电子的运动方向限制在二维空间中, 因而获得较高的迁移率. 此时, 在异质结界面垂直方向上, 传统的载流子输运模型不再有效, 热电子发射模型能很好地模拟异质结及突变结处的电流及能量输运. 界面处的载流子输运通过下式得到:

$$J_{n,2} = J_{n,1}, \quad (3)$$

$$J_{n,2} = a_n q \left[ \nu_{n,2} n_2 - \frac{m_{n,2}}{m_{n,1}} \nu_{n,1} n_1 \times \exp\left(-\frac{\Delta E_C}{kT_{n,1}}\right) \right], \quad (4)$$

$$S_{n,2} = S_{n,1} + \frac{c_n}{q} J_{n,2} \Delta E_C, \quad (5)$$

$$S_{n,2} = -b_n \left[ \nu_{n,2} n_2 kT_{n,2} - \frac{m_{n,2}}{m_{n,1}} \nu_{n,1} n_1 kT_{n,1} \times \exp\left(-\frac{\Delta E_C}{kT_{n,1}}\right) \right], \quad (6)$$

其中,  $\nu_{n,i}$  为热电子发射速度, 由式  $\nu_{n,i} = \sqrt{\frac{kT_{n,i}}{2\pi m_{n,i}}}$  决定.

模拟烧毁的过程还需要考虑器件的自热效应, 计算由自热引起的器件温度分布需要求解以下方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} c_L T - \nabla \cdot \kappa \nabla T \\ & = -\nabla \cdot [(P_n T + \Phi_n) \mathbf{J}_n + (P_p T + \Phi_p) \mathbf{J}_p] \\ & \quad - (E_C + \frac{3}{2} kT) \nabla \cdot \mathbf{J}_n - (E_V + \frac{3}{2} kT) \nabla \cdot \mathbf{J}_p \\ & \quad + q R_{\text{net}} (E_C - E_V + 3kT) + \hbar \omega G^{\text{OPT}}, \end{aligned} \quad (7)$$

式中,  $T$  代表温度,  $\kappa$  代表热导率,  $c_L$  代表晶格热容,  $P_n$  和  $P_p$  分别代表电子和空穴绝对热功率,  $\mathbf{J}_n$  和

$J_p$  分别代表电子和空穴的电流密度,  $E_C$  和  $E_V$  分别为导带底和价带顶能量.

在强电磁脉冲注入下, 器件内部局部电场很高. 本文除了考虑掺杂浓度和载流子散射对迁移率的影响外, 还考虑了高电场对迁移率的影响. 迁移率模型选用 Canali<sup>[21]</sup> 迁移率模型的扩展模型:

$$\mu(F) = \frac{(\alpha + 1)\mu_{low}}{\alpha + \left[ 1 + \left( \frac{(\alpha + 1)\mu_{low}F_{hfs}}{\nu_{sat}} \right)^\beta \right]^{1/\beta}}, \quad (8)$$

式中,  $\mu_{low}$  是低场迁移率, 考虑了载流子散射和温度对迁移率的影响,  $\beta$  是和温度有关的参数,  $F_{hfs}$  是准费米势梯度, 其中参数  $\alpha = 0$ .

载流子的产生复合过程考虑了 Shockley-Read-Hall 复合及载流子雪崩击穿模型. 此外, 还考虑了源、漏极由于高浓度掺杂而引发的载流子隧穿效应.

### 4 仿真结果与分析

首先, 以栅极注入上升沿为 1 ns、注入功率为 33 dBm 的电磁脉冲为例讨论器件内部的升温过程. 图 2 所示为器件内部的升温过程.

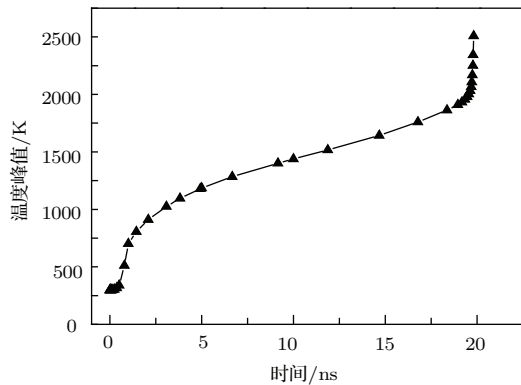


图 2 器件内部峰值温度随时间的变化  
Fig. 2. Variation of the maximum temperature within the HEMT with time.

如图 2 所示, 器件的升温过程分为三个阶段. 温度上升过程中, 上升速率呈现出“快速-减缓-急剧”的趋势. 在 0—3 ns 区间, 温度急剧上升; 3—18 ns, 温度上升平缓; 18 ns—烧毁时刻, 温度再次急剧上升. 图 3 所示为烧毁时刻 HEMT 内部电场强度、电流密度以及温度的分布.

从图 3 中可以看出, 在烧毁时刻, 栅极靠近源端和漏端的柱面处均出现电场的极大值, 二者处于同一数量级, 但是靠近源端的栅极柱面处的电流密度明显大于漏端柱面处. 在电场和电流密度的共同

作用下, 温度峰值出现在栅极靠近漏端的柱面处, 该处是器件最易发生烧毁的位置. 下文通过分析器件内部电场强度、电流密度随电磁脉冲作用时间的变化来分析器件的升温过程.

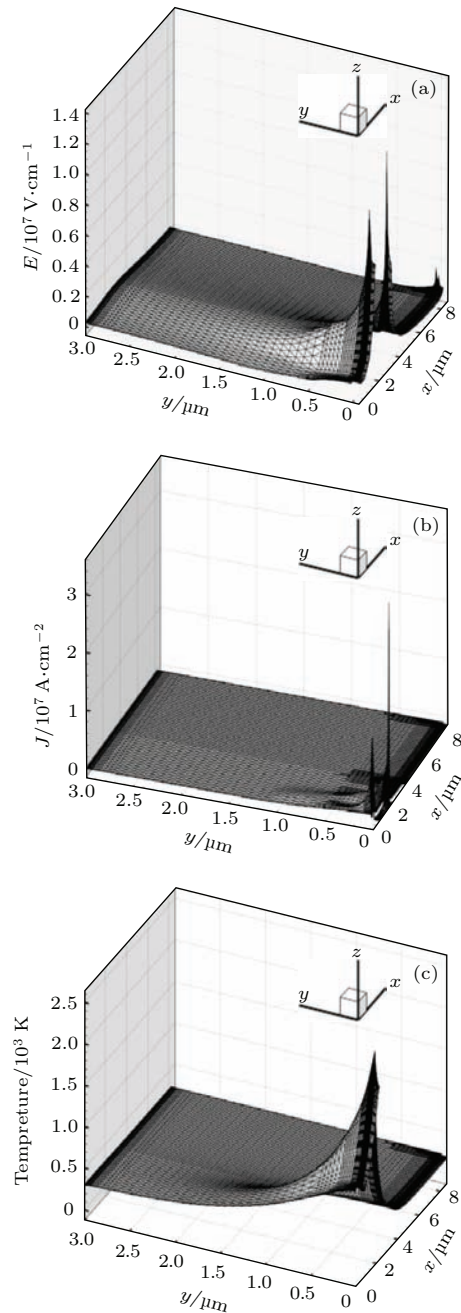


图 3 烧毁时刻器件内 (a) 电场, (b) 电流及 (c) 温度分布图  
Fig. 3. Distribution of (a) electric field; (b) current density; (c) temperature at burn-out time.

#### 4.1 电场强度随时间的变化

图 4 示出了器件内部电场随阶跃脉冲作用时间的变化. 随着栅电压的增大, 在曲率效应的影响

下, 栅极靠近漏端和源端的柱面分别出现电场极大值(图4(a)). 由于栅源距离较近, 因此靠近源端处电场相较于漏端更大. 当电压增大到一定程度

时, 雪崩击穿首先在这个位置出现(图4(b)), 该处电流密度快速增大, 从而使该处电场强度逐渐减小(图4(c)), 电场峰值逐渐下降(图4(d)).

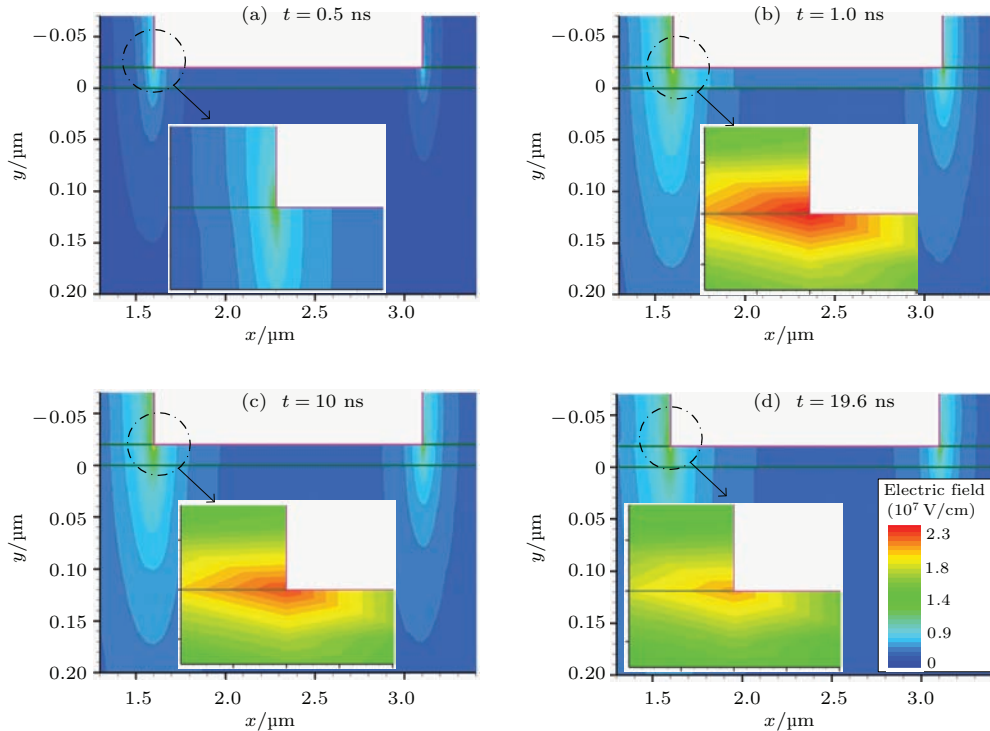


图4 (网刊彩色) 脉冲注入1, 10, 19, 19.6 ns时刻期间内部电场分布

Fig. 4. (color online) Distribution of electric field within device at 1, 10, 19 and 19.6 ns.

## 4.2 电流密度随时间的变化

图5给出了在阶跃脉冲作用下, 器件内部的电流密度随时间的变化. 由于栅极是肖特基接触, 在栅极电压上升过程中, 半导体一侧的势垒随栅电压的升高而降低, 形成从栅电极流向N型AlGaIn势垒层的电流. 外加电压越高, 势垒下降越多, 势垒宽度越小, 电流越大. 肖特基势垒电流符合金属与半导体接触的扩散理论. 此时, 由于AlGaIn/GaN界面极化的正固定电荷产生的二维电子气导电沟道的存在, 电流通过栅极下方的二维电子气沟道流向源极. 在势垒宽度随着外加电压升高而逐渐减小的过程中, N型阻挡层逐渐变薄, 当势垒宽度减小到远小于电子自由程时, 电子在势垒区的碰撞可以忽略, 此时肖特基扩散理论不再适用, 热电子发射电流起主要作用. 1 ns以后, 热电子发射产生的电流逐渐增大, 并开始AlGaIn势垒区形成沟道(图5(b)). 热电子发射电流密度与温度强烈正相关而与外加电压无关. 因此, 18 ns之后, 当器件内部峰值温度已经达到2000 K左右时, 热电子发射电

流占主导, 功率密度随之增大, 导致温度升高. 此时, 器件内部峰值温度与热电子发射电流呈正反馈, 因此器件急速升温, 直至烧毁.

## 4.3 峰值温度随时间的变化

图6是阶跃脉冲作用下器件内部温度随时间的变化情况. 功率密度 $Q = J \cdot E$ , 所以温度由电流密度 $J$ 和电场强度 $E$ 两个参数共同决定. 在阶跃脉冲上升(0—1 ns)阶段, 电场迅速增大, 峰值位于栅极靠近源端的柱面处, 在栅极到源极的电势差作用下, 电流主要通过AlGaIn/GaN界面处的二维电子气沟道流向源端, 在此过程中由于电场变化率极大, 因此温升很快. 由电流峰值主导的温度峰值位于栅极靠近源端柱面下方的AlGaIn/GaN界面处(图6(a)). 随着脉冲作用时间的增加(1—18 ns), 由于热电子发射主导的电流极大值逐步从AlGaIn/GaN界面向AlGaIn表面转移(图6(c)), 发生雪崩击穿后电场峰值逐渐减小, 温度峰值随之转移, 温升减缓. 18 ns以后, 热电子发

射与温升形成正反馈导致电流急剧增大, 电场减小有限, 在电流和电场的同时作用下, 温度再次急剧升高, 因此温度升高呈现出“快速-缓慢-急剧”的

趋势. 从仿真结果来看, 栅极靠近源端的柱面处是器件最先烧毁的位置(图6(d)).

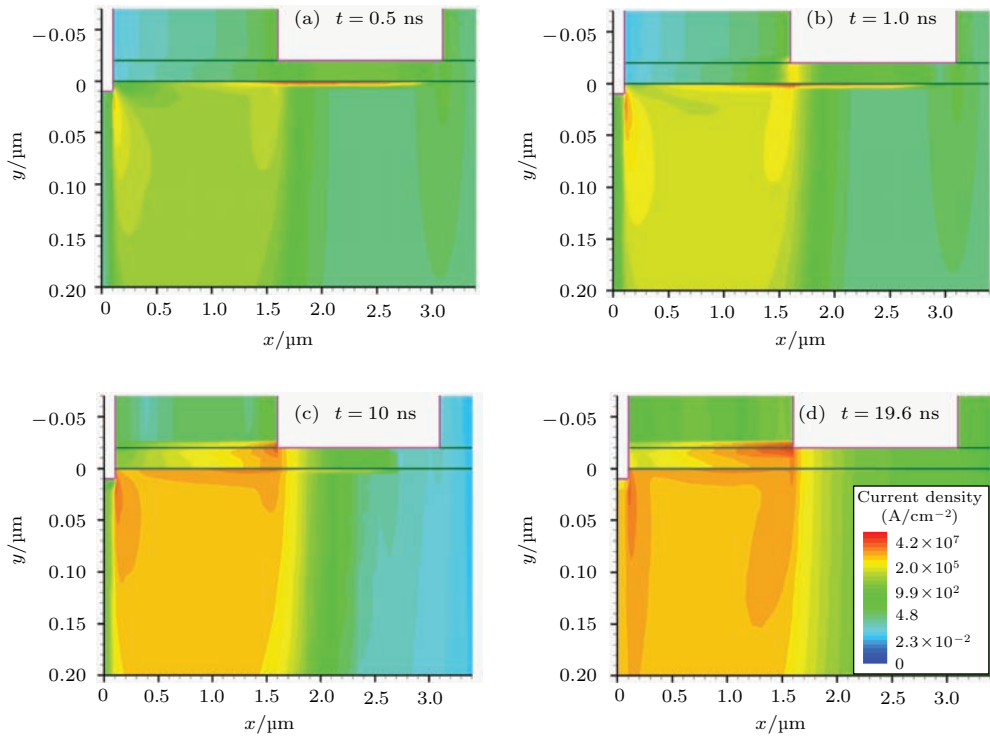


图5 (网刊彩色) 脉冲注入0.5, 1, 10及19.6 ns时刻期间内部电流密度分布

Fig. 5. (color online) Distribution of current density in device at 0.5, 1, 10 and 19.6 ns.

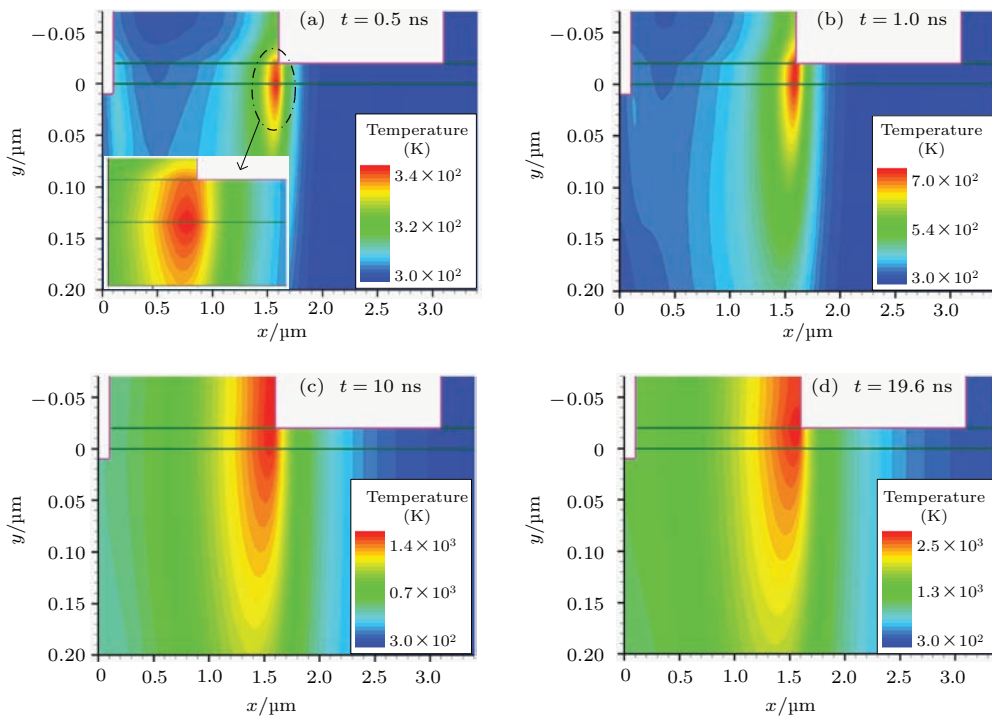


图6 (网刊彩色) 脉冲注入0.5, 1, 10及19.6 ns时刻器件内部温度分布

Fig. 6. (color online) Distribution of temperature in device at 0.5, 1, 10 and 19.6 ns.

#### 4.4 脉宽对损伤功率阈值与损伤能量阈值的影响

传统的电磁研究损伤模型一般都把器件看作球形热源模型<sup>[22]</sup>, 而球形热源模型都是基于器件在强电磁脉冲作用下的损伤能量为恒定值. 但Brown通过实验研究发现器件的损伤能量阈值并非恒定值<sup>[23]</sup>, 因此本文进一步研究了脉宽与功率阈值和能量阈值的关系.

本文将HEMT器件EMP损伤过程中的最大功率值作为该器件的损伤功率阈值, 将器件的烧毁时间作为脉冲的脉宽<sup>[11]</sup>, 获得了如图7所示的关系. 从图中可以看出, 随脉宽的增加烧毁功率阈值迅速下降, 而烧毁能量阈值则随之增大.

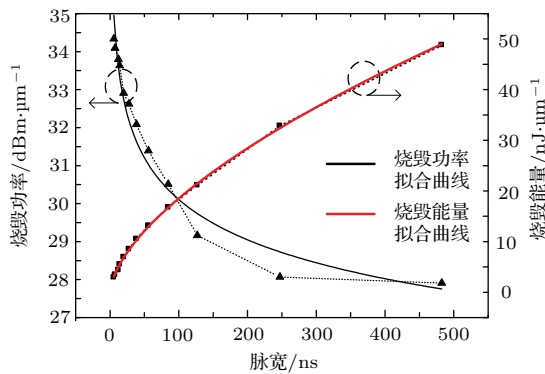


图7 (网刊彩色) 器件脉宽与功率阈值和能量阈值的关系  
Fig. 7. (color online) Pulse-width versus the power and energy threshold.

采用曲线拟合的方法, 分别得脉宽 $\tau$ 与功率阈值和能量阈值的关系:

$$P = 38\tau^{-0.052}, \quad (9)$$

$$E = 1.1\tau^{0.062}. \quad (10)$$

其相关系数 $R^2$ 分别为0.96, 0.99, 表明具有很好的拟合精度, 并且与Jenkins和Durgin<sup>[24]</sup>, Bell等通过实验获得的经验关系式具有相同的形式. 因此, 本文所得到的功率、能量敏感度阈值能够很好地预测器件受损情况.

## 5 结 论

本文采用数值仿真模型对GaN HEMT栅极注入强电磁脉冲时的损伤效应和机理进行了研究. 结果表明, 在热电子发射和曲率效应的双重作用下, 由于热积累效应, 栅极靠近源端的柱面处是最容易毁伤的部位. 当温度升高到一定程度( $\geq 2000$  K)时, 热电子发射与温度升高形成正反馈, 导致温度

急剧升高直至烧毁. 最后, 本文通过数据拟合得到了器件脉宽与损伤功率敏感度阈值和能量敏感度阈值公式 $P = 38\tau^{-0.052}$ ,  $E = 1.1\tau^{0.062}$ , 该结果可更好地对EMP损伤效应进行评估并对器件级EMP抗毁伤加固设计具有指导作用.

## 参考文献

- [1] Radasky W A, Baum C E, Wik M W 2004 *IEEE Trans. Electromagn. Comput.* **46** 314
- [2] Wunsch D C, Bell R R 1968 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **15** 244
- [3] Kyechong K, Iliadis A A 2007 *IEEE Trans. Electromagn. Comput.* **49** 329
- [4] Kim K, Iliadis A A 2008 *Solid-State Electron.* **52** 1589
- [5] Kyechong K, Iliadis A A 2010 *Solid-State Electron.* **54** 18
- [6] Kyechong K, Iliadis A A 2007 *IEEE Trans. Electromagn. Comput.* **49** 876
- [7] Chahine I, Kadi M, Gaboriaud E, Louis A, Mazari B 2008 *IEEE Trans. Electromagn. Comput.* **50** 285
- [8] Ma Z Y, Chai C C, Ren X R, Yang Y T, Chen B, Song K, Zhao Y B 2012 *Chin. Phys. B* **21** 098502
- [9] Ma Z Y, Chai C C, Ren X R, Yang Y T, Zhao Y B, Qiao L P 2013 *Chin. Phys. B* **22** 028502
- [10] Xi X W, Chai C C, Ren X R, Yang Y T, Ma Z Y, Wang J 2010 *J. Semicond.* **31** 074009
- [11] Chai C C, Xi X W, Ren X R, Yang Y T, Ma Z Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8118 (in Chinese) [柴常春, 席晓文, 任兴荣, 杨银堂, 马振洋 2010 物理学报 **59** 8118]
- [12] Ren X R, Chai C C, Ma Z Y, Yang Y T, Qiao L P, Shi C L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 068501 (in Chinese) [任兴荣, 柴常春, 马振洋, 杨银堂, 乔丽萍, 史春蕾 2013 物理学报 **62** 068501]
- [13] Ma Z Y, Chai C C, Ren X R, Yang Y T, Chen B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 078501 (in Chinese) [马振洋, 柴常春, 任兴荣, 杨银堂, 陈斌 2012 物理学报 **61** 078501]
- [14] Yu X H, Chai C C, Liu Y, Yang Y T 2015 *Sci. China-Inf. Sci.* **58** 082402
- [15] Yu X H, Chai C C, Ren X R, Yang Y T, Xi X W, Liu Y 2014 *J. Semicond.* **35** 084011
- [16] Yu X H, Chai C C, Liu Y, Yang Y T, Fan Q Y 2015 *Microelectron. Reliab.* **55** 1174
- [17] Yu X H, Chai C C, Liu Y, Yang Y T, Xi X W 2015 *Chin. Phys. B* **24** 048502
- [18] Ren X R, Chai C C, Ma Z Y, Yang Y T, Qiao L P, Shi C L, Ren L H 2013 *J. Semicond.* **34** 044004
- [19] Porowski S 1997 *Mater. Sci. Eng. B* **44** 407
- [20] Tang Z K, Huang S, Tang X, Li B K, Chen K J 2014 *IEEE Trans. Electron Dev.* **61** 2785
- [21] Synopsys. Sentaurus device user guide: 2013 345–346
- [22] Tasca D M 1970 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **17** 364
- [23] Brown W D 1972 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **19** 68
- [24] Jenkins C R, Durgin D L 1975 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **22** 2494

# Damage effects and mechanism of the GaN high electron mobility transistor caused by high electromagnetic pulse\*

Liu Yang<sup>1)†</sup> Chai Chang-Chun<sup>1)</sup> Yu Xin-Hai<sup>1)</sup> Fan Qing-Yang<sup>1)</sup> Yang Yin-Tang<sup>1)</sup>  
Xi Xiao-Wen<sup>1)</sup> Liu Sheng-Bei<sup>2)</sup>

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

2) (Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

( Received 20 September 2015; revised manuscript received 10 November 2015 )

## Abstract

As electromagnetic environment of semiconductor device and integrated circuit deteriorates increasingly, electromagnetic pulse (EMP) of device and damage phenomenon have received more and more attention. In this paper, the damage effect and mechanism of the GaN high electron mobility field effect transistor (HEMT) under EMP are investigated. A two-dimensional electro-thermal theoretical model of GaN HEMT under EMP is proposed, which includes GaN polarization effect, mobility degradation in large electric field, avalanche generation effect, and self-heating effect. The internal transient response of AlGaIn/GaN HEMT is analyzed under the EMP injected into the gate electrode, and the damage mechanism is studied. The results show that the temperature of device keeps increasing, and the rate is divided into three stages, which present a tendency of “rapid-slow-sharp” till burn-out. The first rapid increasing of temperature is caused by the avalanche breakdown, and then rate becomes smaller due to the decrease of electric field. As the temperature is more than 2000 K, a positive feedback is formed between the hot electron emission and temperature of device, which causes temperature to sharply increase till burn-out. The maximum values of electric field and current density are located at the cylinder surface beneath the gate around the source, which is damage prone because of heat accumulation. Finally, the dependences of the EMP damage power,  $P$ , and the absorbed energy,  $E$ , on pulse width are obtained in a nanosecond range by adopting the data analysis software. It is demonstrated that the damage power threshold decreases but the energy threshold increases slightly with the increasing of pulse-width. The proposed formulas  $P = 38\tau^{-0.052}$  and  $E = 1.1\tau^{0.062}$  can estimate the high power microwave pulse-width dependent damage power threshold and energy threshold of AlGaIn/GaN HEMT, which can provide a good prediction of device damage and a guiding significance for electromagnetic pulse resistance destruction.

**Keywords:** GaN, high electron mobility transistor, electromagnetic pulse, mechanism of damage

**PACS:** 84.40.-x, 85.30.Tv

**DOI:** 10.7498/aps.65.038402

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2014CB339900) and the Open Fund of Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Science and Technology, China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2015-0214.XY.K).

† Corresponding author. E-mail: [liu\\_yang@163.com](mailto:liu_yang@163.com)