

4H-SiC 功率 MESFET 的击穿特性*

吕红亮 张义门 张玉明 杨林安

(西安电子科技大学微电子所, 西安 710071)

摘要: 研究了 4H-SiC MESFET 器件的电学击穿特性和热学稳定性. 建立了金属半导体场效应晶体管器件二维数值模型, 分析了雪崩碰撞离化效应、隧穿效应和热效应在器件击穿中的作用. 综合考虑了栅极偏置、自热效应等因素对击穿的影响. 采用准静态方法, 求解瞬态偏微分方程组, 分析了器件的耐热耐压性能和可靠性.

关键词: SiC; 击穿特性; 金属半导体场效应晶体管

EEACC: 2560B; 2560S; 1220 **PACC:** 7210; 7220; 7280

中图分类号: TN 386 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2004)09-1132-05

1 引言

与 Si 和 GaAs 材料相比, SiC 具有禁带宽度大、临界击穿电场强度高、热导率高、载流子饱和速率高等优越的特性, 有望成为制造高功率/高频电子器件和高温器件的重要半导体材料^[1,2]. 除了体积小、质量轻、功能强大之外, SiC MESFET 还具有线性化程度高、匹配简单等许多应用方面的优势. 最新发布的基于单片的大功率器件数据为(在负载牵引测试条件下): 80W(CW)/120W(pulse)、40~50V 供电、3GHz 工作频率, 展示了 SiC 功率器件的优越性能^[3,4].

目前 SiC 半导体器件模型研究中还存在问题, 对 4H-SiC MESFET 器件的电学极限参数, 如击穿电压、最大功率密度等还不能精确描述; 器件的功率和频率设计依然采用传统模型为依据, 局限了器件电学极限潜力的发挥; 对 4H-SiC MESFET 器件的热学极限参数, 如转换温度、热击穿、安全工作区, 还有待于进一步研究. 为了能充分发挥 SiC 器件功率性能的优势和潜力, 必须对器件的电学击穿特性和热学稳定性进行较为深入的模拟研究.

本文基于 SiC 材料特性, 对 4H-SiC 微波功率 MESFET 器件的击穿机制进行了模拟研究. 综合分

析了栅极偏置、自热效应等因素对击穿的影响. 针对击穿特性, 提出器件结构参数优化, 对如何提高器件的电学和热学特性做出了有益的探索.

2 模型与方法

利用二维器件模拟器, 我们已经建立了基于漂移-扩散理论的自治器件模型, 其中所采用的迁移率模型、部分电离模型、金半接触模型能够很好地反映器件的电学特性^[5]. 本文详细探讨碰撞离化模型、直接隧穿模型和热传导模型.

(1) 碰撞离化模型

$$G^{\text{II}} = \beta_{n,\text{ii}} \frac{J_n}{q} + \beta_{p,\text{ii}} \frac{J_p}{q} \quad (1)$$

其中 G^{II} 为碰撞离化产生率; β_n 和 β_p 分别为电子和空穴的碰撞离化系数; J_n 和 J_p 分别是电子和空穴的电流密度; q 为电子电量. 碰撞离化系数可以表示为电场的函数:

$$\beta_{a,\text{ii}} = \beta_{a,\text{ii}}^{\infty}(T) \exp \left[- \left| \frac{E_c(T)}{E_{a,\parallel}} \right|^{\text{EXP}_a} \right], \quad a = n, p \quad (2)$$

$$\beta_{a,\text{ii}}^{\infty}(T) = A_a + B_a T, \quad a = n, p \quad (3)$$

式中 a 取 n 或 p 分别代表电子和空穴物理量, 详细情况列于表 1.

* 国家重点基础研究发展计划资助项目(No. 51327010101)

吕红亮 女, 1978 年出生, 博士研究生, 从事碳化硅射频功率器件研究.

张义门 男, 1941 年出生, 教授, 博士生导师, 长期从事半导体器件、电路的研究工作.

2003-09-19 收到, 2004-04-20 定稿

© 2004 中国电子学会

表 1 碰撞离化模型参数表

Table 1 Impact ionization parameters used in simulation

| 符号 | $E_c/(V \cdot cm^{-1})$ | EXP | A/cm^{-1} | $B/(cm^{-1} \cdot K^{-1})$ |
|------|-------------------------|--------|-------------------|----------------------------|
| 物理意义 | 临界电场 | 拟合指数系数 | 离化常数 | 温度系数 |
| 电子 | 1.5×10^7 | 1.15 | 4×10^5 | 0 |
| 空穴 | 1.79×10^7 | 1.00 | 6.3×10^6 | -1.07×10^{-4} |

从表 1 中可以看到虽然电子具有更低的有效质量和更大的迁移率, 但是实际测量和模型计算得到的碰撞离化系数却比较小, 这是由于沿 c 轴方向, 电子的能谱是不连续的, 没有发生声子的碰撞隧穿, 不可能达到离化阈值。另一个原因是, 在布里渊区的边界处发生布拉格反射, 使高能载流子发生能量损失^[6]。

(2) 直接隧穿模型

在击穿电压附近, $p-n$ 结耗尽层上的压降高达上百甚至上千伏, 能带发生极大的弯曲, 在每一个能级上隧穿的几率可以近似由 WKB 积分给出^[7]:

$$T = \exp\left(-\int_{x_1}^{x_2} 2K_x(x) dx\right) \quad (4)$$

这里 K_x 是沿隧穿方向的镜像波矢, 禁带中央对位置的函数由 Kane 近似地写为:

$$K_x(\epsilon_m) = \sqrt{\frac{2m^*}{\eta^2 E_g}} \times \sqrt{\left[\frac{E_g}{2}\right]^2 - \epsilon_m^2 + E_g E_+} \quad (5)$$

这里 m^* 和 E_g 分别是传输有效质量和禁带宽度, 对 4H-SiC 材料, 取值为 $m^* = 0.2m_0$, $E_g = 3.26eV$ (300K); E_+ 是沿隧穿方向的电子动能; ϵ_m 定义为: $\epsilon_m(x) = E_m(x) - E$. 从(5)式中可以得到, 当 $\epsilon_m = 0$, K_x 取最大值。

一维电场下 BTBT 电流的计算表达式为:

$$J_{BB} = \frac{qm^*}{2\pi^2\eta^3} \int_{E_{cn}}^{E_{fp}} dE (f_{FD}[E - E_{fp}] - f_{FD}[E - E_{fn}]) \int_0^{E_{0,max}} dE_+ T(E, E_+) \quad (6)$$

上式包含了三层积分: (1) 能量积分, 其中包括了态密度的 Fermi-Dirac 分布函数 f_{FD} . (2) 垂直于隧穿方向的能量积分, 上限可以取到无限大. (3) WKB 积分, 计算每一个 (E, E_+) 上的隧穿几率。

设均匀电场为 F , 积分求出(4)式的解析结果:

$$T(E_+) = \exp\left(-\frac{\pi \sqrt{m^*} E_g^{3/2}}{2 \sqrt{2} q F \eta}\right) \times \exp\left(-\frac{2\pi \sqrt{m^*} E_+}{2q F \eta \sqrt{E_g}}\right) \quad (7)$$

将(7)式带入(6)式, 在单位体积内积分, 可以得到单位时间单位体积内由直接隧穿产生的载流子数, 即隧穿产生率:

$$G^{BB}(F) = \frac{\sqrt{2m^*} q^2}{4\pi\eta^2} \times \frac{F^2}{E_g^{1/2}} \times \exp\left(-\frac{\pi \sqrt{m^*}}{2 \sqrt{2} q \eta} \times \frac{E_g^{3/2}}{F}\right) \quad (8)$$

(3) 热传导模型

$$\rho_c \frac{\partial T}{\partial t} = H + \nabla (\lambda(T) \nabla T) \quad (9)$$

其中 H 是热产生参数, 包括电子传输产生热能、空穴传输产生热能以及载流子发射和复合的晶格热能; λ 是材料热导率的倒数. 对于 4H-SiC, $\lambda = 0.3 \text{ cm} \cdot \text{K/W}$; 比热容取值为 $c = 1000 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 密度 $\rho = 3.21 \text{ g}/\text{cm}^3$.

3 结果与分析

模拟器件采用不对称栅结构, 其截面如图 1 所示. 器件的栅长为 $0.7 \mu\text{m}$, 栅源和栅漏距离分别为 $0.3 \mu\text{m}$ 和 $0.8 \mu\text{m}$.

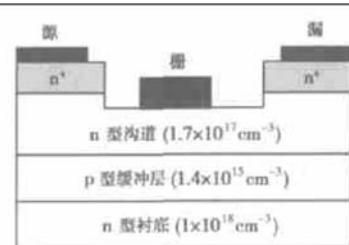


图 1 4H-SiC MESFET 截面示意图

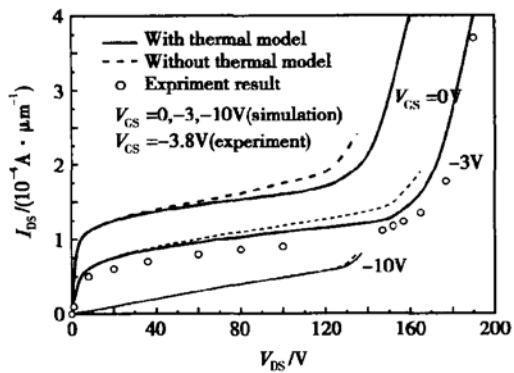
Fig. 1 Cross sectional view of n type 4H-SiC MESFET

3.1 直流击穿特性

对上述器件进行计算, 得到的击穿特性曲线如图 2 所示. 其中实线为考虑热扩散模型的曲线, 虚线则未考虑热效应. 在不同的栅极偏置下, 4H-SiC MESFET 的击穿电压均超过了 100V. 这一计算结果与实验结果^[7,8]能够很好地符合.

热效应击穿结果和绝热模拟结果的区别是:

(1) 饱和电流不同. 热效应条件下计算得到的饱和电流比绝热条件下的小, 并且这种情况随着器件偏压的增大而加剧. 当 $V_{DS} = 50V$ 时, 热效应模型的 $I_{DSTH} = 0.45 \text{ mA}/\mu\text{m}$, 而绝热模型的 $I_{DS} = 0.47 \text{ mA}/\mu\text{m}$.

图 2 器件在不同栅偏压下的击穿特性 $I-V$ 曲线Fig. 2 $I-V$ characteristics under different gate bias

μm . 当 $V_{DS} = 80\text{V}$ 时, $I_{DSTH} = 0.5\text{mA}/\mu\text{m}$, 而绝热的 $I_{DS} = 0.53\text{mA}/\mu\text{m}$, 两种模型模拟结果的差值达到 6%. 这与之前的分析相符^[11].

(2) 击穿电压不同. 包含自热效应的模拟结果为 $V_{Bth} = 115\text{V}$, 绝热结果为 $V_B = 105\text{V}$. 当器件工作在击穿电压附近时, 器件功率耗散剧烈, 温度升高. 碰撞离化率具有负温度系数, 载流子雪崩现象随着温度的升高而减小, 击穿电流的幅度受到抑制, 延缓了器件的雪崩击穿.

图 2 的曲线还反映了源漏雪崩击穿电压随栅极电压的变化情况. 当栅极电压向夹断方向增大时(器件的夹断电压为 $V_{GS} = -12\text{V}$), 击穿电压随栅极电压的变化趋势是先增大, 而后减小. 从三条曲线中可以分别得到器件的击穿电压为 $V_{B0} = 115\text{V}$ ($V_{GS} = 0\text{V}$), $V_{B4} = 125\text{V}$ ($V_{GS} = -4\text{V}$), $V_{B10} = 110\text{V}$ ($V_{GS} = -10\text{V}$).

图 3 显示了 4H-SiC MESFET 的栅极击穿特性. 当漏极偏压增大至 100V 左右, 栅极电流急剧增大. 随着栅极偏置向夹断方向增大, 器件击穿点的变化趋势是先增大后减小. 这是因为栅压的增大引起栅极附近电场增大, 漏极附近的最大电场强度减小, 延缓了击穿的发生. 栅压达到夹断电压附近, 源极附近的缓冲层中有较多的空穴积累, 电压主要降落在栅极附近, 此时漏极电场下降, 电场的峰值出现在栅极附近, 最大电场增大, 导致击穿的提前发生.

3.2 瞬态击穿特性

在功率系统中, 由于输出失配常常会出现大的瞬态脉冲干扰^[9]. 传统的硅器件可以承受的高压脉冲约为直流击穿电压的 150%, 保证系统不发生失

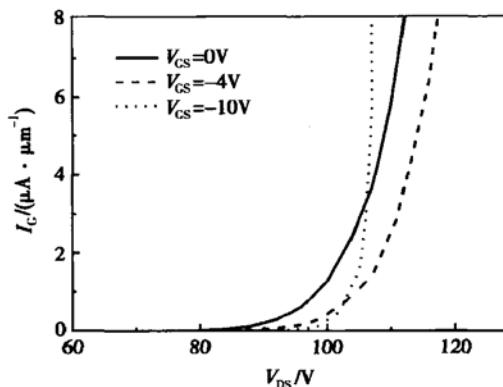


图 3 4H-SiC MESFET 的栅极击穿特性

Fig. 3 Gate breakdown characteristics of MESFET

效, 因此是非常稳定的. 本文模拟了 4H-SiC MESFET 器件瞬态击穿的电学热学特性, 从物理机理上探讨了器件的瞬态击穿稳定性. 在瞬态模拟中, 将器件的直流偏置设为 0V. 直接在源漏极之间施加脉宽为 2ns, 幅值为 150V 的大电压脉冲. 这一数值是直流击穿电压的 125%.

图 4 显示了器件的瞬态电流电压关系. 当高压脉冲来临时, 器件的瞬态电流首先从 A 点增大至 B 点的 0.2A, 然后下降至 C 点, 最后趋于稳定, 为 0.16mA. A, B, C 三点所对应的时间分别为 3.2×10^{-12} , 1.9×10^{-10} 和 2.0×10^{-9} s.

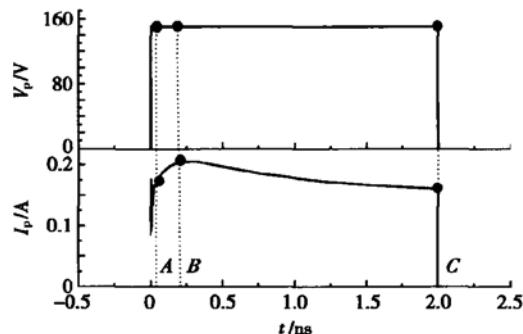


图 4 器件的瞬态脉冲电流电压特性

Fig. 4 Transient pulse $I-V$ characteristics of MESFET device

图 5 显示了器件中的载流子碰撞离化产生率在三个时间点的分布. 规定的碰撞离化率的起始线大约为 $10^{24} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$, 即外围颜色最深的区域, 在这一区域以内直到栅漏极边缘部分, 碰撞离化率逐渐增大, 分别以不同的深度来代表; 在这一区域以外,

碰撞离化率小于 $10^{24} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$, 图中没有给出相应的梯度变化. 在三个时间点上, A 点的分布区域最小, B 点的最大, 这说明碰撞离化的程度不同; 碰撞离化率的最高值分别达到 $\sim 10^{27} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ (A 点), $\sim 10^{29} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ (B 点), $\sim 10^{28} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ (C 点), 依然是 A 点的最小, B 点的最大, 这说明碰撞离化的强度不同. 模拟结果说明 SiC MESFET 具有较好的瞬态稳定性.

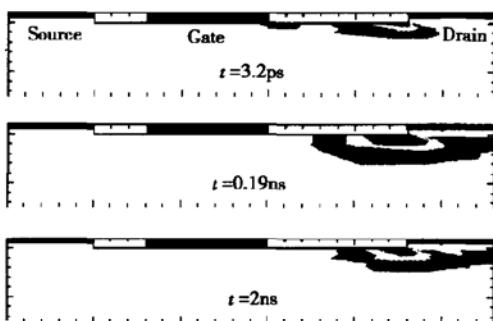


图 5 器件内部碰撞离化率的二维分布

Fig. 5 2-dimension distribution of the impact ionization in device

4 结论

基于 SiC 材料特性, 以 SiC 材料特性参数为基础, 建立了 MESFET 器件的击穿模型, 对 4H-SiC 微波功率 MESFET 器件的击穿特性进行了模拟研究. 综合分析了栅极偏置、自热效应等因素对击穿的影响. 与简单的一维器件相比, MESFET 器件的栅极偏置影响不可忽略, 容易造成器件的提前击穿.

MESFET 的开态击穿发生在大电流大电压的状态下, 器件自热效应的影响显著.

参考文献

- [1] Morse A, Esker P M, Clarke R C, et al. Applications of high power silicon carbide transistors at radar frequencies. IEEE MTT-S Conference Digest, 1996: 677
- [2] Weitzel C. Comparison of SiC, GaAs and Si RF MESFET power densities. IEEE Electron Device Lett, 1995, 16(10): 451
- [3] Pengelly R. High power RF transistors. Wireless and Microwave Technology 2001: An Industry/Government/Education Forum, 2001: 17
- [4] Nilsson P A, Saroukhani A M, Svedberg J O, et al. Characterization of SiC MESFETs on conducting substrates. Materials Science Forum, 2000, 338~342: 1255
- [5] Lü Hongliang, Zhang Yimen, Zhang Yuming. Simulation study for high temperature characteristics of SiC MESFETs. Journal of Xidian University, 2001, 28(6): 776 (in Chinese)
[吕红亮, 张义门, 张玉明. 高温 SiC MESFET 特性模拟研究. 西电学报, 2001, 28(6): 776]
- [6] Bellotti E, Nilsson H E, Brennan K. Monte Carlo calculation of hole initiated impact ionization in 4H phase SiC. J Appl Phys, 2000, 87: 3864
- [7] Remend S. The theory, design and application of microwave field effect transistors. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1987 (in Chinese) [雷蒙德 S. 微波场效应晶体管的理论、设计和应用. 北京: 电子工业出版社, 1987]
- [8] Nilsson P A, Saroukhani A M, Svedberg J O. Characterization of SiC MESFETs on conducting substrates. Materials Science Forum, 2000, 338~342: 1253
- [9] Royet A S, Ouisse T, Cabon B. Self-heating effects in silicon carbide MESFETs. IEEE Trans Electron Devices, 2000, 47(11): 2221

Breakdown Characteristics of 4H-SiC Microwave Power MESFETs^{*}

Lü Hongliang, Zhang Yimen, Zhang Yuming and Yang Lin'an

(Microelectronics Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A profound simulation study on the electrical breakdown characteristics and thermal reliability is investigated. A two-dimensional numerical model for 4H-SiC MESFET is established and the effect of the avalanche and tunneling on the electrical breakdown characteristics is analyzed. The dependence of breakdown voltage on gate bias, self-heating effect, and crystal orientation choice are also investigated systematically. For the transient and thermal reliability simulation, both the first-order backward difference formula (BDF1) and second-order backward differences formula (BDF2) are used to solve the extended matrix.

Key words: silicon carbide; breakdown characteristics; MESFET

EEACC: 2560B; 2560S; 1220 **PACC:** 7210; 7220; 7280

Article ID: 0253-4177(2004)09-1132-05

* Project supported by State Key Development Program for Basic Research of China (No. 51327010101)

Lü Hongliang female, was born in 1978, PhD candidate. She is engaged in the research on SiC RF power devices.

Zhang Yimen male, was born in 1941, professor. He is engaged in the research on semiconductor devices and circuits.