

# 4H-SiC npn BJT 特性研究

龚 欣, 张进城, 郝 跃, 张晓菊

(西安电子科技大学微电子所, 陕西西安 710071)

**摘 要:** 基于二维器件仿真软件 Medici 对 4H-SiC 双极型晶体管(BJT)进行了建模, 包括能带模型、能带窄变模型、迁移率模型、产生复合模型和不完全电离模型, 为 4H-SiC 的工艺与器件提供了设计平台. 在此基础上对 4H-SiC BJT 器件进行了模拟研究. 结果显示, 器件基极电流  $I_B = 1 \mu\text{A}/\mu\text{m}$  时发射极电流增益  $\beta$  为 32.4, 击穿电压  $BV_{CEO}$  大于 800V, 截止频率  $f_T$  接近 1GHz.

**关键词:** 4H-SiC; 物理模型; 双极型晶体管

**中图分类号:** TN304.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 12A-2201-04

## Study on Characteristics of 4H-SiC npn BJT

GONG Xin, ZHANG Jin-cheng, HAO Yue, ZHANG Xiao-ju

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

**Abstract:** A model of 4H-SiC bipolar junction transistor (BJT) based on two-dimensional device simulator Medici is presented. The model, in which bandgap model, mobility model, generation and recombination model and incomplete ionization model are included, provides a design platform for 4H-SiC technologies and devices. The simulation results show that the common-emitter current gain  $\beta$  is 32.4 while the base current  $I_B$  equals to  $1 \mu\text{A}/\mu\text{m}$  with the breakdown voltage  $BV_{CEO}$  more than 800V and the cut-off frequency  $f_T$  close to 1GHz.

**Key words:** 4H-SiC; physical models; bipolar junction transistor

## 1 引言

碳化硅(SiC)由于具有宽带隙、高临界击穿电场、高热导率、高载流子饱和漂移速度,是制造高频高温功率器件的理想材料.在三端器件中,研究工作主要集中在SiC功率MOSFET和MESFET方面,因其开关速度较大、安全工作区范围大以及容易驱动等特点.但是SiC(特别是4H-SiC)MOSFET较低的反型层迁移率和栅氧化层可靠性问题,使得这些器件的电流处理能力比理论值低得多.如考虑栅氧击穿并假设氧化层击穿电场为  $6 \times 10^6 \text{V/cm}^{-1}$ ,则漂移区导通比电阻是理论值的9倍.而另一方面,双极型晶体管(BJT)与大多数的场效应晶体管相比,具有更高的载流子调制和处理能力及较低的导通电阻,而且它是其它双极器件如绝缘栅型双极晶体管(IGBT)、MOS栅晶体管(MGT)、门级可关断晶闸管(GTO)等的重要组成部分.

近年来,有关SiC BJT的研究取得了很大进展. Y. Luo等人于2000年研制出了第一个4H-SiC功率双极型晶体管,阻断电压800V,集电极电流密度达  $104 \text{A/cm}^2$ ,室温下共发射极电流增益9.4,并随温度上升而下降<sup>[1]</sup>. Sei-Hyung Ryu等人研制出了阻断电压为1800V的4H-SiC npn双极晶体管,室温下最大电流放大倍数为20,导通电阻为  $10.8 \Omega \text{cm}^2$ ,该器件的电流

增益显示出接近于零的温度系数(NZTC)<sup>[2]</sup>. Yi Tang等人报道了  $BV_{CEO}$  为500V,电流增益为8的外延基区、注入发射区的4H-SiC BJT,该样品显示了负温度系数的电流增益<sup>[3]</sup>. I. Perez-Wurfl等人于2003年研制了高电流密度及高功率密度的4H-SiC双极晶体管,最大共射极电流增益为17.4,具有负温度系数,最大电流密度为  $42 \text{kA/cm}^2$ ,最大直流功耗功率密度为  $1.67 \text{MW/cm}^2$ <sup>[4]</sup>.但以上晶体管都是基于原位外延掺杂和台面工艺的,目前还没有平面型SiC BJT的报道,本文利用有限元数值模拟器对平面型SiC BJT特性进行了数值模拟,详细给出了模拟中所采用的物理模型和参数,得出了器件的Gummel曲线,共发射极直流电流增益,  $BV_{CEO}$  和  $f_T$ . 在三种最常用的SiC多型(3G-SiC、6H-SiC、4H-SiC)中,4H-SiC和6H-SiC对于功率器件影响较大.垂直于c轴方向上4H-SiC的电子迁移率是6H-SiC的2倍而平行于c轴方向上的电子迁移率是6H-SiC的近10倍,因此4H-SiC较6H-SiC更为重要.本文研究的器件正是基于4H-SiC.

## 2 数值模拟器及物理模型

以器件物理机理为基础的器件模拟器是预测和研究半导体器件特性的有力工具,本文采用的模拟器是二维器件仿真

软件 Medici<sup>[5]</sup>. 它能够计算特定物理结构和偏压下的器件的电特性, 提供很难或不可能测量的信息并且使人们能够更好地洞察和理解器件工作时的内部物理机制.

本文所研究的 4H-SiC BJT 的结构示意图如图 1 所示. 带  $N^-$  外延层的  $N^+$  衬底, 外延层厚度为  $6\mu\text{m}$ , 掺杂浓度为  $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ , 在其上用双扩散或双注入形成基区和发射区, 为简便起见, 设基区和发射区为均匀掺杂. 发射区掺杂浓度为  $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ , 结深  $0.4\mu\text{m}$ , 内基区掺杂浓度为  $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ , 基区宽度为  $0.6\mu\text{m}$ , 外基区掺杂浓度为  $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ , 为减小基极电阻以及提高集电结击穿电压, 重掺杂外基区采用深结扩散或注入, 结深为  $1.5\mu\text{m}$ . 发射极条宽  $1.5\mu\text{m}$ , 基极条宽  $0.75\mu\text{m}$ , 重掺杂外基区与发射区之间的间距为  $0.5\mu\text{m}$ .

物理模型 4H-SiC 的参数来自最新的文献和测试结果. 模拟过程中, 没有考虑 4H-SiC 的各向异性, 主要物理模型有能带及能带窄变, 迁移率, SRH 复合, 俄歇复合, 不完全电离和碰撞电离.

能带模型、导带和价带的有效状态密度及能带窄变模型: 由于没有 4H-SiC 能带随温度变化关系的报道, 我们的模型参数由 6H-SiC 修正而来.

$$E_g(T) (\text{eV}) = E_g(300) - 3.3 \times 10^{-4} (T - 300) \quad (1)$$

式中  $T$  为晶格温度.  $E_g(300)$  为 300K 时 4H-SiC 的禁带宽度, 数值是  $3.26 \text{eV}^{[6]}$ .

4H-SiC 导带和价带的有效状态密度  $N_c$  和  $N_v$  分别取为  $7.68 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  和  $4.76 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ <sup>[7]</sup>, 由方程(2)得出 4H-SiC 本征载流子浓度  $n_i$  为  $2.49 \times 10^{-9} \text{cm}^{-3}$ , 与 Cree 公司报道的  $5 \times 10^{-9} \text{cm}^{-3}$  相近.

$$n_i (\text{cm}^{-3}) = (N_c N_v)^{1/2} \exp\left[-\frac{E_g}{2KT}\right] \quad (2)$$

由重掺杂引起的发射区禁带窄变对晶体管的电流放大系数有直接影响, 因此考虑能带窄变效应是必要的. 在本文模拟中能带窄变以下式<sup>[8]</sup>表示:

$$\Delta E_g (\text{eV}) = 2.0 \times 10^{-2} (F + \sqrt{F^2 + 0.5}) \quad (3)$$

式中  $F = \ln\left[\frac{N_i}{1.0 \times 10^{17}}\right]$ ,  $N_i$  是已电离杂质的总浓度. 考虑了能带窄变效应, 则有效本征载流子浓度变为

$$n_{ie} = n_i \exp(\Delta E_g / 2KT) \quad (4)$$

迁移率模型对器件研究十分重要. 迁移率模型可以分为低场迁移率和高场迁移率模型.

低场迁移率: 与掺杂浓度和温度有关的低场电子迁移率和高场迁移率由 Caughey-thomas 方程<sup>[8]</sup>给出, 对应于 Medici 中的 ANALYTIC 迁移率模型.

$$\mu_n (\text{cm}^2/\text{Vs}) = \frac{947 \times (T/300)^{-2}}{1 + [N_i / (1.94 \times 10^{17})]^{0.61}} \quad (5)$$

$$\mu_p (\text{cm}^2/\text{Vs}) = 15.9 + \frac{124 \times (T/300)^{-2}}{1 + [N_i / (1.76 \times 10^{19})]^{0.34}} \quad (6)$$

式中  $N_i$  是已电离的总杂质浓度.

高场迁移率: 高场下与电场有关的迁移率  $\mu_n^E$  和  $\mu_p^E$  由下式给出:

$$\mu_n^E (\text{cm}^2/\text{Vs}) = \frac{\mu_n}{\left[1 + \left(\frac{E\mu_n}{V_{sat}}\right)^2\right]^{0.5}} \quad (7)$$

$$\mu_p^E (\text{cm}^2/\text{Vs}) = \frac{\mu_p}{1 + \left(\frac{E\mu_p}{V_{psat}}\right)} \quad (8)$$

式中  $\mu_n$  和  $\mu_p$  为低场迁移率, 由式(5)和式(6)得到.  $V_{nsat}$  和  $V_{psat}$  分别是电子和空穴的饱和漂移速度, 由下式确定:  $V_{sat} = V_{sat0} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-0.5}$ , 4H-SiC 300K 时的电子饱和速度  $V_{nsat0}$  为  $2 \times 10^7 \text{cm/s}$ <sup>[6]</sup>, 并假设空穴饱和速度与电子相等.

产生复合模型考虑了 SRH 等机构. Shockley-read-hall (SRH) 复合率  $R_{SRH}$  由下式给出:

$$R_{SRH} = \frac{n p - n_{ie}^2}{\tau_p (n + n_{ie}) + \tau_n (p + n_{ie})} \quad (9)$$

式中,  $n_{ie}$  是有效本征载流子浓度(方程(4)),  $n$  和  $p$  分别是局部电子和空穴浓度, 与掺杂浓度有关的电子和空穴寿命  $\tau_n$  和  $\tau_p$  由 Schafetter 关系式表示为:

$$\tau_n(N_i, T) = \frac{\tau_n(T)}{1 + \left(\frac{N_i}{3 \times 10^{17}}\right)^{0.3}}, \quad (9)$$

式中  $\tau_n(T) = \tau_{n0} \left(\frac{T}{300}\right)^\alpha$ , 参数  $\alpha$  为  $1.72^{[10]}$ , 因此与 SRH 复合有关的电子寿命以下式表示:

$$\tau_n(N_i, T) = \frac{\tau_{n0} \left(\frac{T}{300}\right)^{1.72}}{1 + \left(\frac{N_i}{3 \times 10^{17}}\right)^{0.3}} \quad (10)$$

式中  $\tau_{n0}$  是 300K 下无掺杂时的电子寿命, 取自文献<sup>[10]</sup>,  $N_i$  是已电离杂质的总浓度, 模拟中认为  $\tau_n = 5\tau_p$ .

俄歇复合对于高注入的双极器件很重要. 由于没有关于 4H-SiC 俄歇复合模型参数的报道, 模型中的参数根据 6H-SiC 修正得到<sup>[7]</sup>:

$$R_{Au} = (3 \times 10^{-29} p + 3 \times 10^{-29} n) (np - n_{ie}^2) \quad (11)$$

式中  $n_{ie}$  是有效本征载流子浓度(方程(4)),  $n$  和  $p$  分别是局部电子和空穴浓度.

碰撞电离由碰撞电离产生的电子空穴产生率用下式表示

$$\text{为: } G_{ava} = \alpha_n \frac{|J_n|}{q} + \alpha_p \frac{|J_p|}{q} \quad (12)$$

式中  $J_n$  和  $J_p$  分别是电子和空穴浓度,  $\alpha_n$  和  $\alpha_p$  分别是电子和空穴的电离系数, 将它们表示为<sup>[7]</sup>:

$$\alpha_n = 3.44 \times 10^6 \exp\left[-\frac{E_{nc}(T)}{|E|}\right] \quad (13)$$

$$\alpha_p = 3.24 \times 10^7 \exp\left[-\frac{E_{pc}(T)}{|E|}\right] \quad (14)$$

式中  $E_{nc}$  和  $E_{pc}$  分别是电子和空穴的临界电场, 它们对温度的依赖关系为<sup>[7]</sup>:

$$E_{nc}(T) = \frac{E_g(T)}{q\lambda_n(T)} \quad (15)$$

$$E_{pc}(T) = \frac{E_g(T)}{q\lambda_p(T)} \quad (16)$$

式中  $\lambda_n(T) = 1.67425 \times 10^{-7} \cdot \tanh\left(\frac{0.1042}{2KT}\right)$ ,  $\lambda_p = 2.11673 \times 10^{-7} \cdot \tanh\left(\frac{0.1042}{2KT}\right)$ , 分别为电子和空穴的光声子平均自由程。

不同于 Si, 4H-SiC 中的杂质能级较深, 因此在室温下甚至更高的温度下杂质也不会完全电离, 需考虑杂质的不完全电离效应, 电离施主和受主浓度由以下两式表示:

$$N_D^+ = \frac{N_D}{1 + 2\exp\left(\frac{E_{Fn} - E_D}{kT}\right)} \quad (17)$$

$$N_A^+ = \frac{N_A}{1 + 4\exp\left(\frac{E_{Fp} - E_A}{kT}\right)} \quad (18)$$

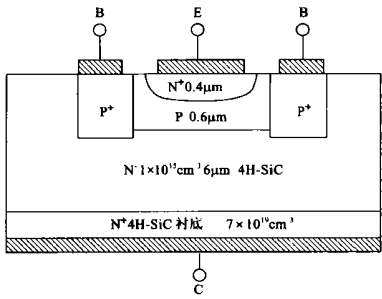


图 1 4H-SiC BJT 结构示意图

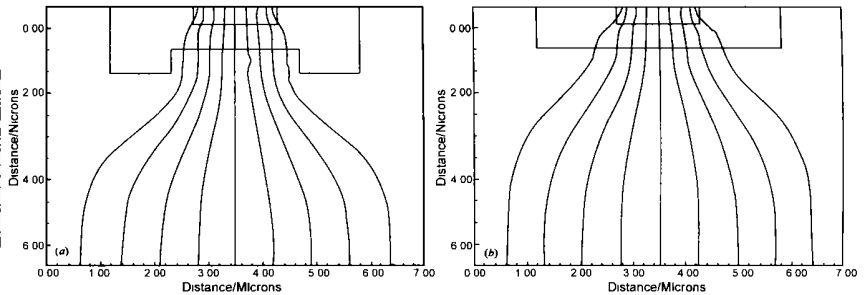


图 2  $V_{BE} = 3.1V$ ,  $V_{CE} = 5.0V$  时 4H-SiC BJT 的电流线 (a) 重掺杂外基区结深为  $1.5\mu m$ ; (b) 重掺杂外基区结深为  $0.2\mu m$

图 3 是器件的 Gummel 曲线, 因为较大的禁带宽度, SiC BJT 的导通压降约为 2.7V, 远远大于 Si 的 0.7V. 从图中还可看出在较大的  $V_{BE}$  范围之内, 集电极电流显示出较理想的特性, 当  $V_{BE} > 3.0V$  时, 由于大注入和串联电阻的影响, 集电极电流和基极电流上升幅度有所下降. 但在一个很宽的电压范围内, 电流增益几乎是一个常数.

由 Gummel 曲线得出的器件的直流电流增益随工作电流的变化曲线示于图 4, 从中可以看出在低注入区域, 基区输运系数随注入电流增加而增大起主要作用, 使  $\beta$  随  $I_C$  的增加而增大, 而在大注入下, 由大注入效应引起的发射效率下降起主要作用以及由基区扩展效应引起的基区宽度增加, 使得  $\beta$  随注入电流增大而下降. 从图中看出当电流密度大于  $10^{-4}A/\mu m$  时, 由大注入引起的电流增益的下降就比较明显了. 另一个制约大电流下电流增益的因素是由于基极电阻上的压降所造成

式中  $E_{Fn}$  和  $E_{Fp}$  分别为电子和空穴的准费米能级,  $E_D$  是施主杂质能级,  $E_A$  是受主杂质能级. 在本文中分别选氮和铝作为 4H-SiC 的 N 型和 P 型杂质, 它们的电离能分别为  $E_D = 65meV$ ,  $E_A = 191meV^{[11]}$ .

以上构成了基于 Medici 软件的 4H-SiC npn BJT 的工艺和器件设计平台.

### 3 模拟结果和讨论

图 2 示出  $V_{BE} = 3.1V$ ,  $V_{CE} = 5V$  时, 重掺杂外基区结深分别为  $1.5\mu m$  和  $0.2\mu m$  的器件内部的电流线, 通过对比可以看出较深的重掺杂外基区结深可以有效减小大电流下集电极电流集边效应.

的集电极电流集边效应.

图 5 给出了 4H-SiC BJT 的共射极输出特性曲线, 可以看出当基极电流  $I_B > 2\mu m$  时,  $\beta$  逐渐减小. 当基极电流  $I_B = 1\mu A/\mu m$  (基极电流密度  $J_B = 50A/cm^2$ ) 时, 集电极电流  $I_C = 32.4\mu A/\mu m$  (集电极电流密度  $J_C = 463A/cm^2$ ), 对应共射极电流增益为 32.4. 图 5 还显示出两段饱和特性, 如图中深饱和区(A)和准饱和区(B), 这是由 N 型集电区轻掺杂造成的, 降低集电区的电阻率可以减小饱和压降, 提高最大集电极电流, 但却与提高击穿电压相矛盾, 因此应该兼顾.

图 6 示出了器件集电极与发射极之间的击穿特性, 从中得出器件的  $V_{CEO}$  大于 800V.

图 7 是器件特征频率随工作电流的变化关系. 在  $V_{CE}$  恒定时,  $f_T$  首先随电流  $I_C$  增加而很快上升, 上升速度随  $I_C$  增大而减慢, 达到极大值后, 再随  $I_C$  增加而下降. 这是因为在小电

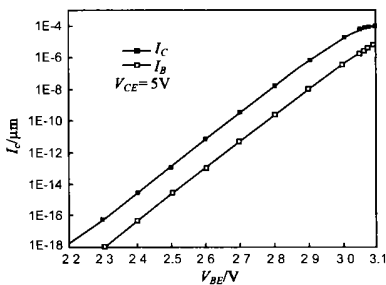


图 3 当  $V_{CE} = 5.0V$  时 4H-SiC BJT 的 Gummel 曲线

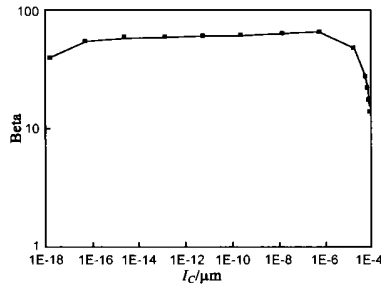


图 4 4H-SiC BJT 共射极电流增益随集电极电流的变化

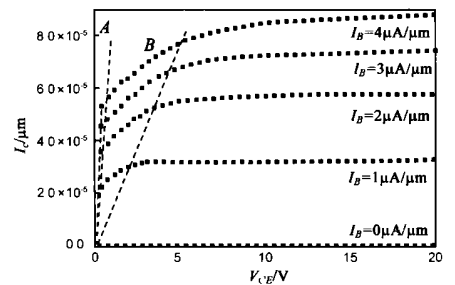


图 5 4H-SiC BJT 的共射极输出特性曲线

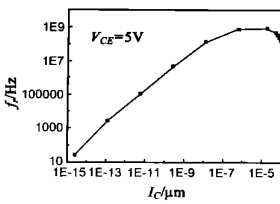
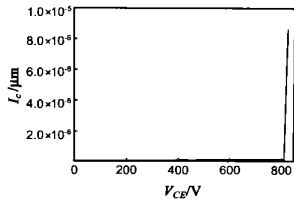


图 6 4H-SiC BJT 的击穿特性曲线 图 7 4H-SiC BJT 特征频率随集电极电流的变化

流下,  $r_e$  很大,  $\tau_e$  成为影响  $f_T$  的主要因素。当  $I_C$  增加时,  $r_e$  变小,  $\tau_e$  随  $I_C$  增加而迅速减小, 使  $f_T$  随  $I_C$  增加迅速上升。当  $\tau_e$  减小到小于  $\tau_b$  时,  $\tau_b$  成为影响  $f_T$  的主要因素。随着  $I_C$  增加, 注入不断增加, 对于均匀基区晶体管, 基区只存在大注入自建电场, 载流子受到的漂移作用随注入的增加而增强, 使  $\tau_b$  随注入增加而减小,  $f_T$  上升到由  $\tau_b$  决定的最大值。当电流进一步增加到超过某一临界值后, 大电流下的基区扩展效应使基区渡越时间因基区扩展而很快增加, 从而导致  $f_T$  迅速减小。

#### 4 结论

本文详细列举了用二维器件模拟软件 Medici 对 4H-SiC BJT 进行模拟所采用的物理模型和参数, 其中包括能带模型, 能带窄变模型, 迁移率模型, 产生复合模型和不完全电离模型, 为 4H-SiC 的工艺与器件提供了设计平台; 在此基础上对 4H-SiC BJT 室温下的的基本特性器件进行了模拟, 得出了器件的 Gummel 曲线, 共射极电流增益,  $BV_{CE0}$  和  $f_T$ ; 最后对器件的物理机理进行了分析和解释。鉴于目前还没有平面型 4H-SiC BJT 研究方面的报道, 本文对于其进一步的理论研究及实际器件制造具有重要的指导意义。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Y Luo, L Fursin, J H Zhao. Demonstration of 4H-SiC power bipolar junction transistors [J]. IEE Electronics Letters, 2000, 36(17): 1496-1497.
- [ 2 ] Sei-Hyung Ryu, Anant K Agarwal, et al. 1800V NPN bipolar junction transistors in 4H-SiC [J]. IEEE Electron Device Letters, 2001, 22(3): 124-126.

- [ 3 ] Yi Tang, Jefferey B Fedison, T Paul Chow. High-voltage implanted-emitter 4H-SiC BJT's [J]. IEEE Electron Device Letters, 2002, 23(1): 16-18.
- [ 4 ] I Perez Wurfl, R Krutinger, et al. 4H-SiC bipolar junction transistor with high current and power density [J]. Solid-State Electronics, 2003, 47(2): 229-231.
- [ 5 ] Medici User's Manual [Z]. version 4. 1, Avant! Corporation, TCAD Business Unit.
- [ 6 ] Silicon Carbide: Physics & Electronic properties [DB/OL]. [http://www.cree.com/Products/sic\\_silicarb.asp](http://www.cree.com/Products/sic_silicarb.asp), 2004-02-09.
- [ 7 ] Martin Lades. Modeling and Simulation of Wide Bandgap Semiconductor Devices: 4H/6H-SiC [DB/OL]. 2000. <http://tumblr.bibliotummuenden.dellpubl/diss/ei/2000/lades.pdf>, 2004-02-17.
- [ 8 ] 1997 Atlas User Manual [Z]. Santa Clara, CA: Silvaco International.
- [ 9 ] Ruff Martin, Mitlehner Heinz, Helbig Reinhard. SiC Devices: Physics and Numerical Simulation [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1994, 41(6): 1040-1053.
- [ 10 ] O Kordina and, J P Bergman. The minority lifetime of n-type 4H-SiC and 6H-SiC epitaxial layers [J]. Appl. Phys. Lett, 1996, 69(5): 679-681.
- [ 11 ] Bakowski M, Gustafsson U, et al. Simulation of SiC high power devices [J]. Phys. star Sol(a), 1997, 162(1): 421-440.

#### 作者简介:



龚欣女, 1979 年生于山东省菏泽市, 博士研究生, 主要从事宽禁带半导体器件研究。

张进城 男, 1976 年生于陕西富平, 博士研究生, 主要从事 MOS 器件可靠性及宽禁带半导体器件研究。

郝跃 男, 1958 年生于重庆, 教授, 博士生导师, 主要从事 IC 可靠性、可制造性、设计方法学以及半导体新器件与电路研究。