

# 槽栅结构 SiC 材料 IGBT 的仿真及优化分析

李俊楠 战可涛\*

(北京化工大学 理学院, 北京 100029)

**摘 要:** 运用半导体物理理论和功率器件模拟软件(SILVACO-TCAD),研究了新型宽禁带材料 SiC 槽栅结构 IGBT 功率半导体器件的电学特性,模拟了不同厚度和掺杂浓度漂移层和缓冲层的 IGBT 器件的阈值电压、开关特性和导通特性曲线,并分析了漂移层和缓冲层厚度及掺杂浓度对电学特性的影响。结果表明,当 SiC-IGBT 功率器件漂移层和缓冲层厚度分别为  $65\ \mu\text{m}$  和  $2.5\ \mu\text{m}$ ,掺杂浓度分别为  $1 \times 10^{15}$  和  $5 \times 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$  时,得到击穿电压为  $3400\ \text{V}$ ,阈值电压为  $8\ \text{V}$ 。

**关键词:** 4H-SiC; 绝缘栅双极型晶体管; 阈值电压; 击穿电压; 开关特性

**中图分类号:** TN386

## 引 言

绝缘栅双极型晶体管(IGBT)是一种由 MOSFET 和双极功率晶体管结合形成的达林顿结构。它融和了这两种器件的优点,具有 MOSFET 器件驱动功率小、开关速度快的优点,又具有双极型器件饱和压降低、容量大的优点,频率特性介于 MOSFET 与功率晶体管之间,可正常工作于几十 kHz 频率范围内,在现代电力电子技术以及新能源领域中得到了广泛的应用,在较高频率的大、中功率应用中占据主导地位。目前主流的 IGBT 器件是由硅材料制备,由于材料本身的原因,在恶劣环境下不能体现 IGBT 器件优良的电学特性。SiC 半导体材料相比硅材料具有高临界电场、高热导率、宽禁带等物理特性<sup>[1]</sup>,因此 SiC 正在成为大功率、耐高压、抗辐照等优良器件的优选材料。目前 SiC 器件因为 SiC 晶片的厚度的关系,较多采用的是平行栅结构,但是平行栅结构会导致比较严重的闩锁现象<sup>[2]</sup>。为了有效的防止闩锁效应以及降低导通电阻,在门极的设计上使用了槽栅结构。

本文以 SiC 材料以及槽栅结构 IGBT 为模型,利用 SILVACO-TACD 半导体器件模拟软件对功率器

件(SiC-TIGBT)进行电学特性的模拟,分析结构参数对器件的阈值电压、开关特性、导通特性等重要技术指标的影响,得到了性能优异的 SiC-TIGBT。

## 1 SiC-TIGBT 器件

图 1 是仿真模拟的 SiC-TIGBT 的半个元胞的结构截面。由于槽栅结构中  $\text{SiO}_2$  绝缘层与 SiC 的晶格不完全匹配,退火过程中会引入一部分悬挂不饱和化学键,所以设界面态的固定电荷密度为  $1 \times 10^{11}\ \text{cm}^{-2}$ <sup>[3]</sup>。SiC 材料和金属接触时一般达不到欧姆接触,设金属 Al 和 4H-SiC 的接触电阻率为  $\rho = 5 \times 10^{-5}\ \Omega/\text{cm}^2$ <sup>[4]</sup>。SiC-TIGBT 的结构参数及掺杂浓度见表 1。由于漂移层和缓冲层区域的浓度和厚度需要重点讨论,在初始的模型中没有具体给出。

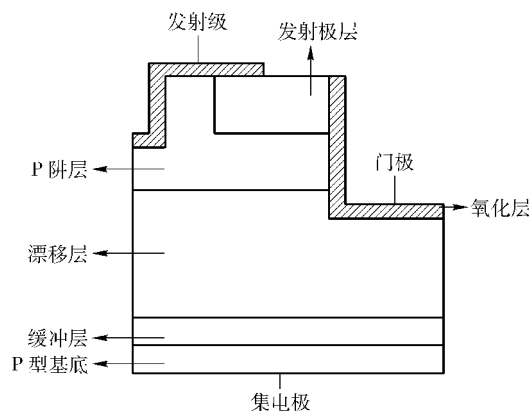


图 1 SiC-TIGBT 截面图

Fig. 1 Cross section of the SiC-TIGBT

收稿日期: 2011-05-03

第一作者: 男, 1986 年生, 硕士生

\* 通讯联系人

E-mail: Zhankt@mail.buct.edu.cn

表1 SiC-TIGBT 结构参数及掺杂浓度

Table 1 The structure and doping parameters for SiC-TIGBT

区域名称	区域厚度/ $\mu\text{m}$	区域宽度/ $\mu\text{m}$	区域掺杂浓度/ $\text{cm}^{-3}$
P 阱层	2.5	5.0	$1 \times 10^{17}$
漂移层	待讨论	6.0	待讨论
发射极层	1.0	3.5	$1 \times 10^{18}$
P 型基底层	2.0	6.0	$1 \times 10^{19}$
缓冲层	待讨论	6.0	待讨论
门极氧化层	0.8	1.0	无
门极	3.0	1.0	无

## 2 SiC-TIGBT 阈值和开通特性

调节阈值电压的方法很多,埋沟结构比较适合 SiC 材料,这种栅极沟道结构在 SiC MOSFET 功率器件上应用<sup>[5]</sup>,可以有效的改变阈值电压<sup>[6]</sup>,减小 SiC 和  $\text{SiO}_2$  界面缺陷对阈值电压的影响,提高器件工作特性。本文将埋沟结构技术应用到 SiC-TIGBT 中,埋栅结构是在半导体内部形成的沟道,载流子不会受到界面态电荷的影响。具体工艺为槽栅区表面注入与其沟道掺杂类型相反的施主型离子(对于 P 型基底掺杂离子为砷离子,漂移区的浓度和厚度为:  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  和  $65 \mu\text{m}$ )。IGBT 功率器件阈值电压的计算公式为:

$$V_{\text{th}} = -V_{\text{ms}} - \frac{Q_{\text{ss}}}{C_{\text{ox}}} + 2\phi_{\text{FB}} + \frac{\sqrt{2\varepsilon_0\varepsilon_{\text{sic}}qN_{\text{Amax}}(2\phi_{\text{FB}})}}{C_{\text{ox}}} \quad (1)$$

式(1)中,  $\phi_{\text{FB}} = \frac{\kappa T}{q} \ln \frac{N_{\text{Amax}}}{n_i}$ 。

从公式(1)中可知阈值电压与栅氧化电容  $C_{\text{ox}}$ , 功函数  $V_{\text{ms}}$ , SiC-SiO<sub>2</sub> 界面电荷密度  $Q_{\text{ss}}$ , SiC 介电常数  $\varepsilon_{\text{sic}}$ , 平带电压  $\phi_{\text{FB}}$ , P 型沟道最大掺杂浓度  $N_{\text{Amax}}$  有关,但是由公式(1)可知起主导作用的是  $N_{\text{Amax}}$ 。掺入施主类型的离子后,  $N_{\text{Amax}}$  的数值产生较大变化,即随着掺入的浓度不同,阈值电压也会跟随变化。在模拟中掺杂方式为沟道内离子注入并且设掺杂浓度的分布为高斯分布。

图2分别为掺杂峰值浓度为  $0, 1 \times 10^{17}, 5 \times 10^{17}, 1 \times 10^{18}$  和  $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  的转移特性曲线。由图2可知阈值电压随着掺杂浓度的增加呈现非线性减小,这是因为半导体形成反型层的电压值随着浓度的变化非线性减小造成的。

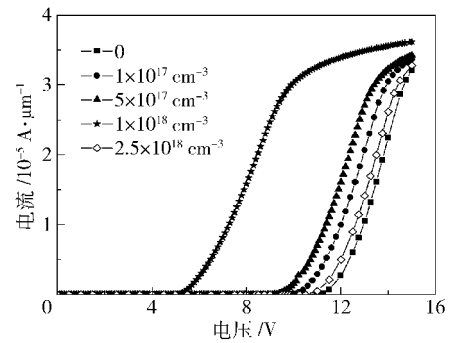


图2 不同埋沟浓度的转移特性曲线

Fig. 2 Transfer characteristics of SiC-TIGBT for different buried-channel doping

图3所示为器件不同埋沟浓度下开通 V-I 特性曲线,图4为  $V_{\text{G}} = 15 \text{ V}$ ,  $V_{\text{C}} = 10 \text{ V}$ , 掺杂沟道浓度  $7.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  下的器件电流密度分布。由图3和图4可知在槽栅附近电流密度很大,在沟道附近掺杂浓度高降低了在沟道附近的导电电阻,从而使器件有更强的导通能力和较大的安全工作区域。如果在沟道附近掺入施主杂质浓度过高可以降低导电电阻和降低阈值电压,但是掺入过多施主杂质会减小 N 型发射层和 P 型基底结之间耐压能力导致 IGBT 功率器件的反向耐压能力大幅下降。

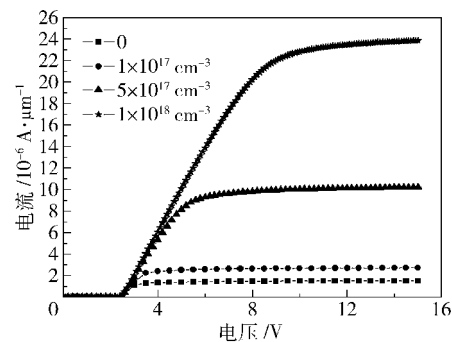


图3 不同埋沟浓度下 SiC-TIGBT 伏安特性曲线

Fig. 3 The current-voltage characteristics of SiC-TIGBT for different buried-channel doping

## 3 SiC-TIGBT 导通和击穿特性

漂移层厚度和掺杂浓度是 SiC-TIGBT 功率器件重要设计指标,也是击穿电压的主要影响因素<sup>[4]</sup>,同时也影响稳态状态的导电电阻。

图5和图6是漂移区在浓度和厚度分别取  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  和  $65 \mu\text{m}$  时 SiC-TIGBT 的 V-I 曲线。

对比图5和图6可以发现,导通特性随着浓度的变化要远远大于漂移层厚度的改变,这是由于在

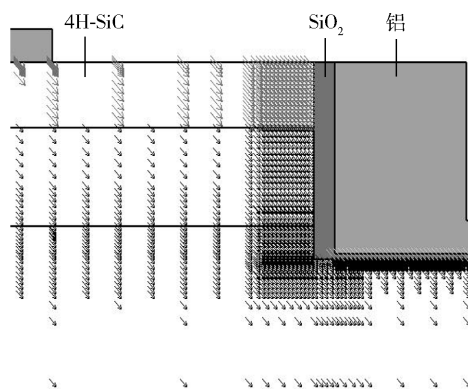


图4 SiC-TIGBT 槽栅周围电流密度分布示意图

Fig. 4 Current flow distribution around trend-gate in the SiC-TIGBT

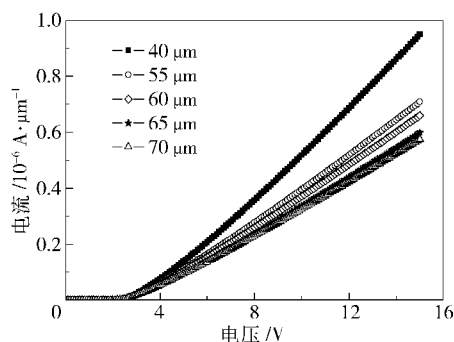


图5 不同漂移区掺杂浓度的 SiC-TIGBT 伏安曲线

Fig. 5 The current-voltage characteristics of SiC-TIGBT with different drift region doping

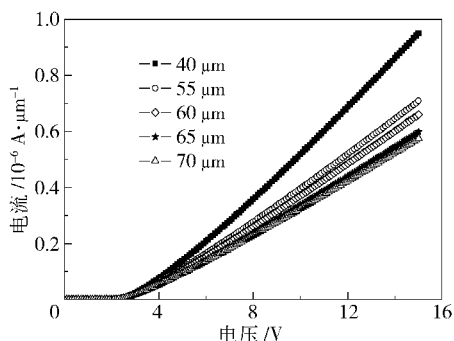


图6 不同漂移区厚度的 SiC-TIGBT 伏安曲线

Fig. 6 The current-voltage characteristics of SiC-TIGBT in different drift region thickness

常温下 SiC 材料较强的“冻析”效应<sup>[7]</sup>,类似于 Si 材料在低温环境下表现出来的物理特性。由于掺入杂质以后产生了较多的自由电子后削弱了“冻析”效应减小了导通电阻。在图 5 中厚度越小导通电阻越小,在集电极电压升高的过程中厚度小的导通电阻减小的更为迅速。其原因是在大注入的条件下载流子从 P 型基底流向漂移层,引起漂移层的电阻率急

剧下降,从而产生电导调制效应。由于电导调制效应只和漂移层的厚度和载流子的浓度有关,所以在厚度越小的情况下单位体积内的载流子的密度越高从而电导调制效应越明显<sup>[8]</sup>。

图 7 为沟道浓度为  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,厚度为  $65 \mu\text{m}$  的击穿曲线 ( $V_G = 5 \text{ V}$ ,漂移区掺杂浓度为  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ),由图 7 可见,在厚度为  $65 \mu\text{m}$ 、门极电压为  $5 \text{ V}$  时,击穿电压就已经达到  $3400 \text{ V}$ ,此结果符合常规条件 SiC-TIGBT 功率器件的反向击穿指标。在权衡击穿和导通两个性能指标后,选取漂移层的浓度为  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,厚度为  $65 \mu\text{m}$ 。

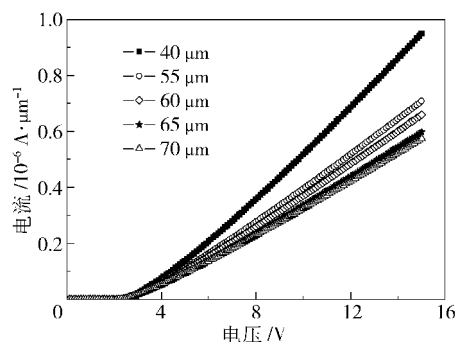


图7 SiC-TIGBT 击穿曲线

Fig. 7 Breakdown voltage of SiC-TIGBT

#### 4 缓冲层设计和开通关断特性

缓冲层是 SiC-TIGBT 导通时载流子运输的重要枢纽,影响导通特性和关断特性。除此之外缓冲层也影响到载流子分布,即可以通过缓冲层的设计来控制载流子的注入效率<sup>[1]</sup>。缓冲层的厚度和掺杂浓度是缓冲层设计的两个重要指标,因为 SiC-TIGBT 功率器件的导通损耗和关断损耗是矛盾的,最佳的浓度和厚度需要权衡两者的关系,应该通过分析两者的关系得到最优参数。

图 8 为 SiC-TIGBT 开通、关断特性的电路,在门极上输入矩形波。

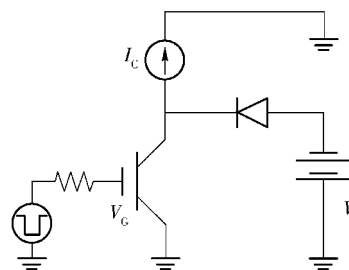


图8 模拟测试关断特性的电路

Fig. 8 The switching simulation circuit

在漂移层厚度为  $65\text{ }\mu\text{m}$ , 浓度为  $1 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$ ,  $1.5 \times 10^{-8}\text{ s}$  的时间内线性增加到  $15\text{ V}$  的开通电压, 持续时间为  $8 \times 10^{-8}\text{ s}$ , 然后以相同的时间关断的条件下, 不同缓冲层厚度和浓度的开通关断特性曲线见图 9 和图 10。关断损耗在缓冲层厚度一定的条件下, 浓度越高关断损失越大; 在缓冲层浓度一定的情况下, 厚度较大损失越大。这是由于在以上的条件下, 缓冲层里面储存了大量电荷, 导致在关断的过程中增大了能量的损耗。缓冲层的浓度和厚度较高对稳态时的导通压降是有益处, 但是过高的掺杂浓度会大幅降低反向击穿电压, 所以必须保持一定的掺杂浓度和厚度。

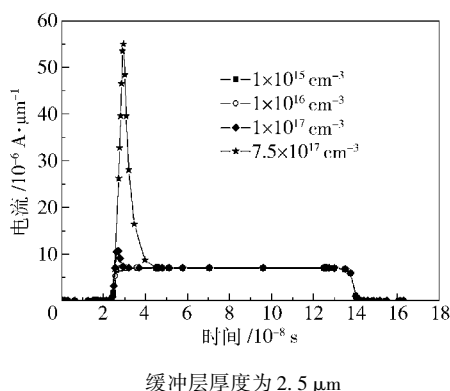


图 9 不同缓冲层浓度开通关断 SiC-TIGBT 特性曲线  
Fig. 9 The turn on/off characteristics of SiC-TIGBT with different buffer region doping

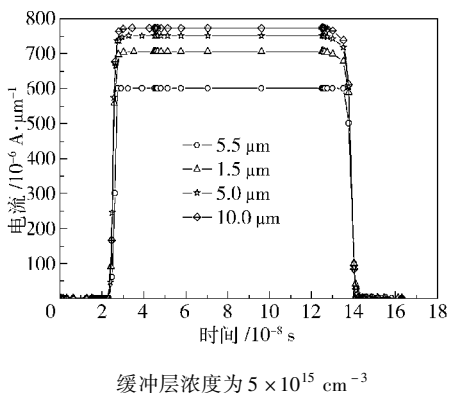


图 10 不同缓冲层厚度开通关断 SiC-TIGBT 特性曲线  
Fig. 10 The turn on/off characteristics of SiC-TIGBT with different buffer region thickness

图 11 为漂移层厚度在漂移层厚度为  $65\text{ }\mu\text{m}$ , 浓度为  $1 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$  的条件下的伏安曲线。由图 11 可知, 缓冲层的厚度对电学特性在给定厚度为  $65\text{ }\mu\text{m}$ , 浓度为  $1 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$  漂移层的条件下变化幅度并不大。缓冲层厚度越大往往要求在工艺制造中离子注入能量越高, 所以在电学特性变化不大的条件

下尽量选择缓冲层厚度小的模型, 以便降低工艺制造难度, 即最后确定缓冲层参数为厚度  $2.5\text{ }\mu\text{m}$ , 缓冲层掺杂浓度  $5 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$ 。

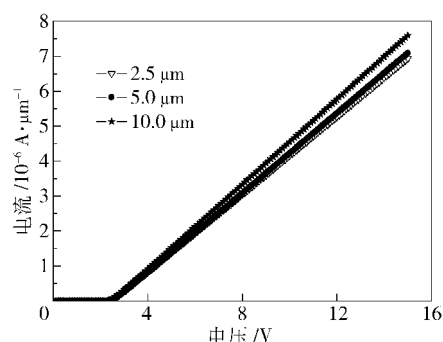


图 11 不同缓冲层厚度 SiC-TIGBT 伏安曲线

Fig. 11 The current-voltage characteristics of SiC-TIGBT with different buffer region thickness

## 5 结论

通过对 SiC 宽禁带材料的栅槽结构 IGBT 功率器件的仿真模拟, 得到了不同漂移层和缓冲层厚度和掺杂浓度的电学特性曲线。当 SiC-IGBT 功率器件漂移层和缓冲层厚度分别为  $65\text{ }\mu\text{m}$  和  $2.5\text{ }\mu\text{m}$ , 掺杂浓度分别为  $1 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$  和  $5 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$  时, 击穿电压为  $3400\text{ V}$ , 阈值电压为  $8\text{ V}$ 。

## 参考文献:

- [1] Saha A, Cooper J A. A 1 kV 4H-SiC power DMOSFET optimized for low on-resistance [J]. IEEE Trans on Electron Devices, 2007, 54(10): 2786-2791.
- [2] 袁寿财. IGBT 场效应半导体功率器件导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 148-149.  
Yuan S C. The Introduction of IGBT Field-Effect power semiconductor devices [M]. Beijing: Science Press, 2008: 148-149. (in Chinese)
- [3] Yano H, Katafuchi F, Kimoto T, et al. Effects of wet oxidation/anneal on interface properties of thermally oxidized  $\text{SiO}_2/\text{SiC}$  MOS system and MOSFET's [J]. IEEE Trans on Electron Devices, 1999, 46(3): 504-510.
- [4] Tamaki T, Walden G G, Sui Y, et al. Optimization of on-state and switching performances for 15 - 20 kV 4H-SiC IGBTs [J]. IEEE Trans on Electron Devices, 2008, 55(8): 1920-1927.
- [5] 郇锦侠. 4H-SiC 埋沟道 MOSFET 理论和实验分析研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.  
Gao J X. A simulation study of 4H-SiC buried-channel MOSFET [D]. Xi'an: Xidian University, 2005. (in Chinese)

- Chinese)
- [6] Banerjee S, Chow T P, Gutmann G J. 1300 V 6H-SiC lateral MOSFET with RESURF zones [J]. IEEE Trans on Electron Devices, 2002, 23(10): 624–627.
- [7] Campi J, Shi Y, Yan B, et al. Study of interface state density and effective oxide charge in post-metallization annealed SiC/SiO<sub>2</sub> structures [J]. IEEE Trans on Electron Devices, 1999, 46(3): 511–514.
- [8] 何进, 张兴, 黄如, 等. 电导调制型功率器件用穿通结构基区优化理论 [J]. 半导体学报, 2000, 21(8): 786–791.
- He J, Zhang X, Huang R, et al. Optimum design of base region in punch-through structure used in conductivity-modulated power device [J]. Chinese Journal of Semiconductor, 2000, 21(8): 786–791. (in Chinese)

## Simulation and analysis of a SiC trench insulated gate bipolar transistor (IGBT)

LI JunNan ZHAN KeTao

(School of Science, Beijing University of Chemistry and Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The Silvaco technology computer aided design (TCAD) component simulation software based on semiconductor theory has been used to simulate an insulated gate bipolar transistor (IGBT). In order to study the characteristics of the wide bandgap semiconductor material SiC, SiC-TIGBT devices with different thicknesses and dopant concentrations in the drift region and buffer region were compared. The effect of varying the parameters of the SiC-TIGBT on its electrical characteristics—such as threshold voltage, breakdown voltage and turn on/off characteristics—has been analyzed. The thickness of the optimized drift region and buffer region in SiC TIGBT were found to be 65  $\mu\text{m}$  and 2.5  $\mu\text{m}$ , respectively. The optimized dopant concentrations in the drift region and buffer region were  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  and  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , respectively. The optimized SiC TIGBT had a threshold voltage of 8 V and a breakdown voltage of 3400 V.

**Key words:** 4H-SiC; IGBT; threshold voltage; breakdown voltage; turn-on /off characteristic