

双极模式 SiC JFET 功率特性的研究*

张林^{1)†} 杨霏²⁾ 肖剑¹⁾ 谷文萍¹⁾ 邱彦章¹⁾

1) (长安大学电子与控制工程学院, 道路交通检测与装备工程技术研究中心, 西安 710064)

2) (中国电子科技集团公司第十三研究所, 专用集成电路国家重点实验室, 石家庄 050051)

(2010年12月5日收到; 2011年1月17日收到修改稿)

研究了常关型 SiC 双极模式结型场效应晶体管 (BJFET) 的工作机理并建立了数值模型. 仿真结果表明 SiC BJFET 的双极工作模式可以有效的降低器件的开态电阻, 折中器件的正反向特性而不增加工艺难度. 仿真结果还表明 SiC BJFET 的双极工作模式会延长器件的开关时间.

关键词: 碳化硅, 双极型, 结型场效应晶体管, 模型

PACS: 73.40.Lq, 73.40.Sx, 81.05.Zx, 84.30.Jc

1. 引言

随着航空航天、新能源、汽车电子技术的发展, 对功率半导体器件的性能提出了越来越高的要求. 硅和砷化镓等传统材料制成的功率器件的性能已经没有太大的提高空间, 而且不能在高温等恶劣环境下工作. SiC 材料具有禁带宽度大、热导率高、击穿电场高和辐射容限高等优良特性, 成为制备新一代功率半导体器件的首选材料^[1]. 目前 SiC 肖特基二极管 (SBD) 已经商用并在电力电子领域显示了优越的性能^[2-4].

SiC 全控型功率器件的发展相对较慢, 由于受限于 SiC MOS 界面层的质量, SiC 功率 MOSFET 和 IGBT 至今未能投入商用. SiC JFET 是电压控制的单极型器件, 具有开关速度快、输入阻抗高、高温特性好、制备工艺成熟等优点, 成为近年来发展速度最快的 SiC 功率器件之一^[5-8], 并成为继 SiC SBD 之后第二种商用的 SiC 电力电子器件^[9].

在电力电子技术中, 常关型器件比常开型器件有着更广泛的应用. 但是由于 SiC 工艺和器件结构的特点, 常关型 SiC JFET 的制备不但工艺难度大, 而且开态电阻难以降低. 为了调和 SiC JFET 的关态

特性与开态电阻之间的矛盾, 引入电导调制效应是比较理想的选择, 常见的方案有两种^[10]: 一是采用类似于 SITH (静电感应晶闸管) 的结构, 在漏极引入一个 pn 结, 但这会提高工艺难度; 二是将 SiC JFET 工作于双极模式下 (BJFET), 让栅源 PN 结正偏向沟道内注入的少数载流子以调制开态电阻. 类似思想曾在 Si 基 JFET 中得到过应用, 但 SiC 双极型 JFET 尚未见报道. 本文建立了 SiC BJFET 的数值模型, 研究了其功率特性.

2. 模型与参数

SiC BJFET 的器件结构可以采用目前比较成熟的 TI-VJFET 的结构, 如图 1 所示. 该结构采用刻蚀的方法形成纵向沟道, 采用偏角离子注入的方法形成栅区. 由于多了栅-沟 pn 结的电导调制效应, 从工艺上可以采用降低外延掺杂、减小栅间距等方法获得更好的关态特性, 增加了器件设计的灵活度, 降低了工艺难度. SiC BJFET 的工作机理如下:

$V_{gs} \leq 0$ 时, 栅沟 pn 结的耗尽层将沟道夹断, 器件处于关态; 此时仅有微小的漏电流经过器件, 器件处于关态.

当 V_{gs} 为正但较低时, 沟道中的势垒降低, 器件

* 西安市科技计划 (批准号: No. CX1012) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: CHD2010JC054) 资助的课题.

† E-mail: zhanglin_dk@chd.edu.cn

电流上升. 栅极注入的少数载流子可以忽略, 器件的电流为多子电流, 此时器件工作于单极模式.

当 V_{gs} 为正且足够大时, 栅极向沟道中注入大量的少数载流子; 沟道中的势垒进一步降低, 源区电子注入, 在沟道区和外延层一定范围内形成高浓度的电子-空穴等离子体, 使得所在区域发展成为准中性区并产生显著的电导调制效应. 此时 SiC BJFET 工作于双极模式, 器件处于开态.

器件由开通转为关断时, 需要将沟道中的少数载流子清除. 因此, SiC BJFET 比 SiC JFET 开关速度慢. 设置 BJFET 的工作点时, 需要在正向特性与开关速度之间折中.

采用 ISE TCAD 10.0 仿真研究了双极型 SiC JFET 的功率特性, 仿真采用的器件结构如图 1 所示, 主要物理模型与参数如表 1 所示.

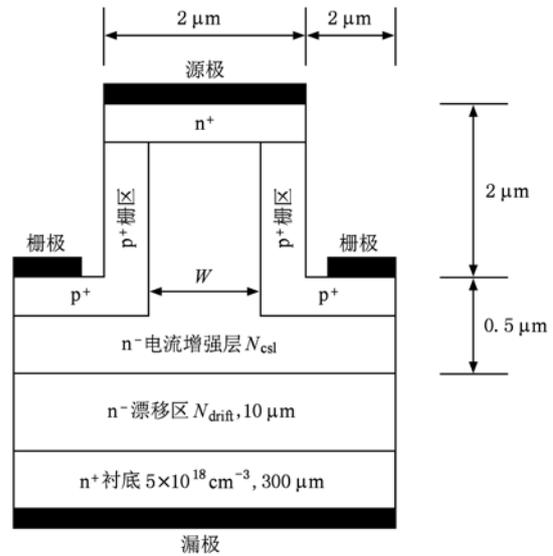


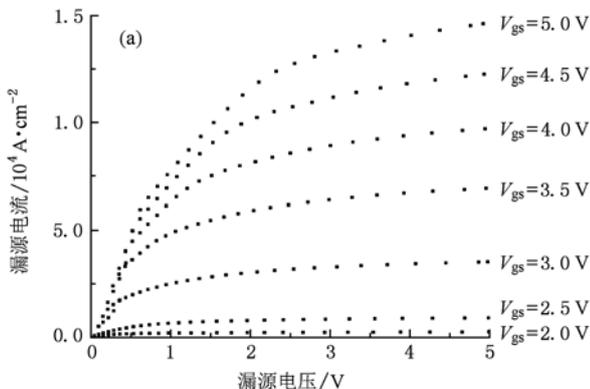
图1 SiC BJFET 结构剖面图

表1 物理模型与参数

禁带宽度/eV	$E_g = 3.26 - 3.3 \times 10^{-4} T$
迁移率/cm ² V ⁻¹ s ⁻¹	$\mu_n = \frac{1020}{1 + \left(\frac{N_D + N_A}{1.5 \times 10^{17}}\right)^{0.61}} \left(\frac{T}{300}\right)^{-2}, \mu_p = \frac{112}{1 + \left(\frac{N_D + N_A}{4 \times 10^{18}}\right)^{0.4}} \left(\frac{T}{300}\right)^{-2}$
少子寿命/s	$\tau_n = \frac{2.5 \times 10^{-6}}{1 + \left(\frac{N_A + N_D}{3 \times 10^{17}}\right)^{0.5}} \left(\frac{T}{300}\right)^{1.72}, \tau_p = \frac{0.5 \times 10^{-6}}{1 + \left(\frac{N_A + N_D}{3 \times 10^{17}}\right)^{0.3}} \left(\frac{T}{300}\right)^{1.72}$
不完全离化/cm ⁻³	$N_D^+ = \frac{N_D}{1 + 2e^{\frac{E_{Fn} - E_C + 0.065 - 1.9 \times 10^{-8} N_D^{1/3}}{\kappa T}}}, N_A^+ = \frac{N_A}{1 + 4e^{\frac{E_F - E_{Fp} + 0.19 - 3.0 \times 10^{-8} N_A^{-1/3}}{\kappa T}}}$
欧姆接触/Ωcm ²	$\rho_n = 5 \times 10^{-5}, \rho_p = 5 \times 10^{-4}$

3. 仿真结果与讨论

采用图 1 所示的器件结构以及上述模型与参数对 SiC BJFET 的电学特性进行了研究.



3.1. 开态特性

图 2 是 SiC BJFET 的开态特性, 其中 $W = 1 \mu\text{m}$, $N_{cs1} = N_{drift} = 5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$.

从图中可以看到, 当 $V_{gs} < 3 \text{V}$ 时, 栅极的注入

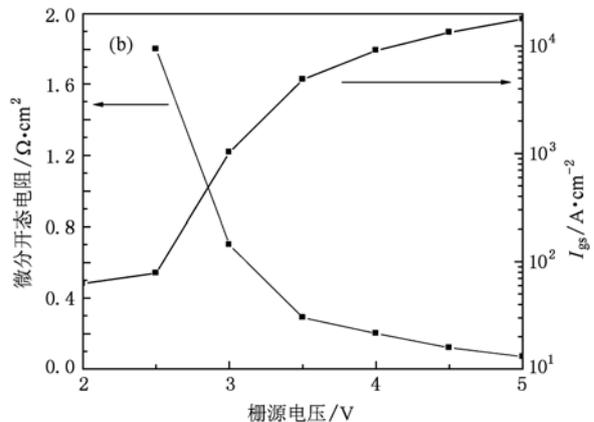


图2 SiC BJFET 的开态特性 (a) 输出特性; (b) $V_{ds} = 0.5 \text{V}$ 的微分开态电阻与栅极电流

电流较小,与漏电流相比可以忽略,此时器件处于单极模式, I - V 特性类似一个常关型的 JFET;当 $V_{gs} > 3$ V 时,栅源二极管正向开启,注入少数载流子,电导调制效应出现,此时器件处于双极工作模式, I - V 特性类似于 BJT.

3.2. 结构参数的影响

传统结构的常关型 SiC JFET,如何折中开态电阻和关态特性是器件设计中的难点. 常见的方法是在沟道区域增加一个电流增强层以降低开态电阻. 而对于 SiC BJT,由于存在栅极 pn 结的正向注入,沟道区域的掺杂浓度对 BJT 开态电阻的影响不像对 JFET 那样敏感,仿真结果如图 3 所示,其中 $W = 1 \mu\text{m}$.

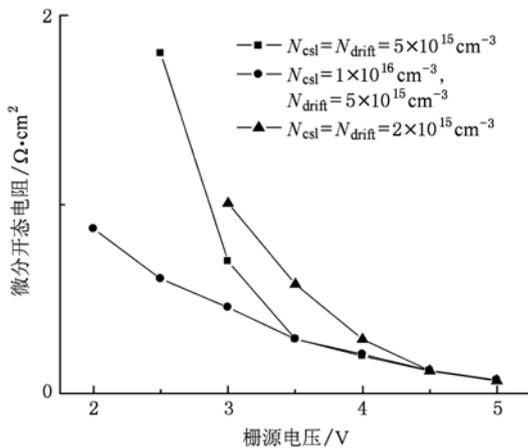


图3 不同沟道掺杂浓度的开态电阻

仿真结果表明,不同的掺杂浓度对于器件开态电阻的影响都是在单极模式下才明显. 随着栅极电压的升高,由于电导调制效应的作用,掺杂浓度对器件的开态电阻的影响不再明显. 因此在 SiC BJT 的器件结构设计和工艺制备中可以尽量降低沟道区和漂移区的掺杂浓度,以获得更良好的关态特性.

对于普通的 SiC JFET,沟道宽度是器件功率特性的敏感参数,同时影响着器件的开态电阻和关态特性. 图 4 是不同沟道宽度的 SiC JFET 的开态电阻,其中 $N_{csl} = N_{drift} = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. 当沟道宽度减小至 $0.5 \mu\text{m}$ 时,在双极工作模式下,开态电阻与 $W = 1 \mu\text{m}$ 时的仅有较轻微的退化,显示了优越的功率特性.

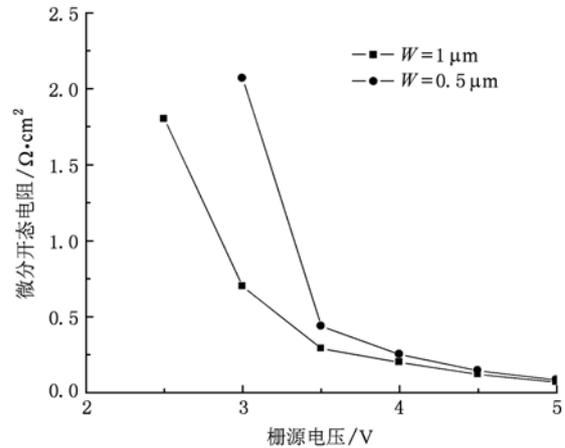


图4 不同沟道宽度的开态电阻

3.3. 瞬态特性

当 SiC BJT 处于开态时,沟道中有大量的非平衡载流子;当器件从开通转为关断时,需要将多余的载流子抽取完后才能转为关态. 图 5 是不同栅压工作时 SiC BJT 的开关特性,其中 $W = 1 \mu\text{m}$, $N_{csl} = N_{drift} = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. 栅压为 3 V 时,器件的开通和关断都是几 ns;栅压为 4 V 时,器件的开通时间超过 100 ns,关断时间超过 500 ns. 仿真结果表明,BJT 的开关时间比 JFET 有明显上升. 而在实际应用中,BJT 的开关时间还受栅极反抽电流大小等因素的限制^[11]. 从理论上分析,采用肖特基接触替代 pn 结作为 BJT 的栅极^[12],或者降低沟道区域的少子寿命(如辐照、掺入深能级杂质等)等工艺方法,可以解决这个问题.

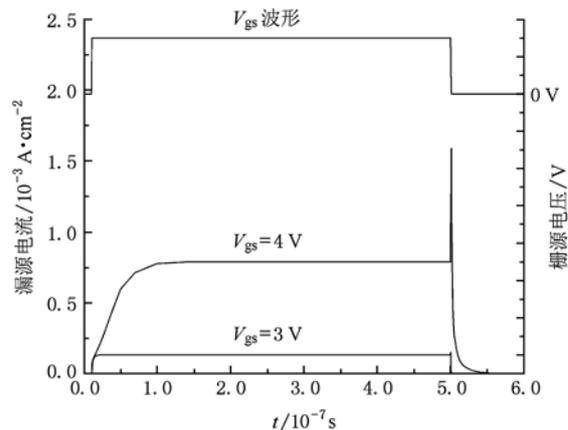


图5 不同栅极偏压下的开关特性

4. 结 论

分析了 SiC BJFET 的工作机理并仿真了其功率特性. 研究表明, 栅极 pn 结的正向注入可以有有效的降低器件的开态电阻. 与常规的 SiC JFET 相

比, SiC BJFET 的双极工作模式可以更有效的调和开态电阻和关态特性之间的矛盾, 而不改变器件结构或者增加工艺复杂度, 具有巨大的发展潜力. 同时, 该器件有两个缺点: 一是双极工作模式会延长器件的开关时间, 降低工作频率; 二是开态和开关过程中, 需要栅极驱动电路具有较大的功率.

- [1] Zhang Y M 1998 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xidian University) (in Chinese) [张小明 1998 博士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]
- [2] Matsunami H 2006 *Microelectron Engineering* **83** 2
- [3] Yang Y T, Geng Z H, Duan B X, Jia H J, Yu C, Ren L L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 0566 (in Chinese) [杨银堂、耿振海、段宁兴、贾护军、余 涔、任丽丽 2010 物理学报 **59** 0566]
- [4] Zhang L, Zhang Y M, Zhang Y M, Han C, Ma Y J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 288 (in Chinese) [张 林、张义门、张小明、韩 超、马永吉 2009 物理学报 **58** 288]
- [5] Yasunori Tanaka, Mitsuo Okamoto, Akio Takatsuka, Kazuo Arai, Tsutomu Yatsuo, Koji Yano, Masanobu Kasuga 2006 *IEEE Electron Device Letters* **27** 908
- [6] Li Yuzhu, Alexandrov Petre, Zhao Jian H 2008 *IEEE Transactions on Electron Devices*, **55** 1880
- [7] Veliadis V, Snook M, McNutt T, Hearne H, Potyraj P, Lelis Aivars, Scozzie C 2008 *IEEE Electron Device Letters* **29** 1325
- [8] Veliadis V, McNutt T, Snook M, Hearne H, Potyraj P, Scozzie C 2008 *IEEE Electron Device Letters* **29** 1132
- [9] <http://www.semisouth.com/products/products.html>
- [10] Li S Y 2001 *Static Induction Transistor: Physics, Process and Experiment Gansu* (Lanzhou: Lanzhou University Press) p28 (in Chinese) [李思渊 2001 静电感应器件: 物理、工艺与实践 (兰州: 兰州大学出版社) 第 28 页]
- [11] Yin C Q, Zhao H Q 1994 *Power Electronics* **1** 50 (in Chinese) [尹成群、赵焕庆 1994 电力电子技术 **1** 50]
- [12] Henning J P, Przdacka A, Melloch M R, Cooper J A 2000 *IEEE Electron Device Letters* **21** 578

Power characteristics of SiC bipolar-mode JFET*

Zhang Lin^{1)†} Yang Fei²⁾ Xiao Jian¹⁾ Gu Wen-Ping¹⁾ Qiu Yan-Zhang¹⁾

1) (School of Electronic and Control Engineering, Road Traffic Detection and Equipment Engineering Research Center, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

2) (The National Key Laboratory of ASIC, The 13th Research Institute, CETC, Shijiazhuang 050051, China)

(Received 5 December 2010; revised manuscript received 17 January 2011)

Abstract

The operational mechanism of normally-off type bipolar-mode SiC junction field effect transistor (BJFET) is studied by using a two-dimensional numerical model. Compared with the unipolar-mode SiC JFET, the bipolar-mode can reduce the on-state resistor of the SiC JFET effectively and compromise between the on-state and off-state characteristic of the device. The simulation results also show that switching time of BJFET increases remarkably.

Keywords: silicon carbon, bipolar mode, JFET, model

PACS: 73.40.Lg, 73.40.Sx, 81.05.Zx, 84.30.Ic

* Project supported by the Science and Technology of Xi'an, China (Grant No. CXY1012), and the Special Fund for Basic Scientific Research of Central Colleges, Chang'an University (Grant No. CHD2010JC054).

† E-mail: Zhanglin_dk@chd.edu.cn