

4H-SiC MOSFET 的温度特性研究 *

徐昌发 杨银堂 刘 莉

(西安电子科技大学微电子所 西安 710071)

(2001 年 7 月 27 日收到 2001 年 9 月 12 日收到修改稿)

对 4H-SiC MOSFET 的器件结构和温度特性进行了研究 , 总结了器件的结构参数对特性的影响 , 比较了不同温度下的输出特性以及饱和漏电流、阈值电压、跨导、导通电阻与温度的变化关系 , 模拟结果表明 4H-SiC MOSFET 具有优异的温度特性 , 在 800K 下可以正常工作 .

关键词 : 4H-SiC , MOSFET

PACC : 7280 , 5701 , 5841

1. 引 言

SiC 材料具有高击穿电场 (4×10^6 V/cm) , 高饱和电子漂移速率 (2×10^7 cm/s) , 高热导率 (4.9 W/cm·K) 等优良特性^[1] , 已引起电子材料和微电子技术领域的广泛关注 . 目前 , 国外已经研制出许多 SiC 器件和电路以应用于高温、高功率和强辐射等环境中 , 而在这些条件下 , 普通半导体材料器件和电路是难以胜任的 (如宇航、国防、石油勘探、高温辐射等领域) , SiC 器件具有工作于这些极端条件下的能力 , 特别是在高温高功率方面 , SiC MOSFET 等器件的性能远远超出同类 Si 器件 , 这使得 SiC 材料和器件成为微电子技术的研究热点和重要前沿 , 在国民经济和军事等诸多领域有着广泛的应用前景 .

SiC 材料是一种高稳定性半导体 , 最显著的特征是存在同质多型体现象 . 在半导体应用时 4H-SiC 和 6H-SiC 由于其单晶生长工艺的成熟性以及较好的重复性 , 使它们在电子器件中应用比较广泛 . 4H-SiC 的载流子迁移率较 6H-SiC 的要高 , 这使其成为大多数 SiC 器件的首选材料 . 6H-SiC 本身固有的迁移率各向异性使之在平行于 c 轴方向的电导率有所下降 , 因此 MOSFET 器件多选用 4H-SiC .

近年来 , 随着 SiC 工艺中的金属化、离子注入、氧化及刻蚀等关键技术的长足进步 , 国内外在 SiC MOSFET 器件研制方面取得了可喜的成果 , 各类 SiC

器件都显示了良好的温度特性和电特性 . 用 SiC 材料制成的 NMOSFET 和 PMOSFET 器件^[2] 在 350°C 具有较好的电特性 , Chatty 等人^[3] 研制的 MOSFET 的击穿电压达到了 1200V , 而 Agarwal 等人^[4] 研制的 4H-SiC UMOSFET 的击穿电压达到 1400V , 显示了 SiC 器件在高温、高压应用领域的优势 . 然而目前尽管在 SiC MOSFET 的工艺和器件研制方面取得了很大成功 , 国内外在 SiC MOSFET 器件模拟方面的报道却很少 . 要想充分发挥 SiC 的应用潜力 , 理论上和实践上都还有许多工作要做 . 由于 SiC 的能级较深 , 杂质在常温下的离化率很小 , 只有在高温时 (> 700 K) 杂质才能大部分离化 , 所以在器件应用的大部分温度范围内 , 杂质都是部分离化的 , 这是和 Si , GaAs 材料不一样的 , 基于 SiC 材料的优良特性 , 为了深入了解 SiC 器件的物理特性和性能 , 尽可能缩短器件研制和试验周期 , 优化设计和工艺 , 对 SiC 器件进行模拟是极为重要的 . 笔者利用二维器件仿真软件 MEDICI^[5] 分析了 4H-SiC MOSFET 器件结构参数对特性的影响 , 并进一步对器件的温度特性进行了研究 .

2. 器件结构与模型

结合国内目前的工艺条件 , 笔者设计了 4H-SiC MOSFET 的器件结构 , 其横截面示意图如图 1 所示 . 设计的器件模型为平面 n 型 MOSFET , 材料为 n 型衬底 , p 型外延层 , 外延层厚度为 $1\mu\text{m}$, 掺杂浓度为 $2 \times$

* 国家自然科学基金(批准号 69976023) 教育部跨世纪优秀人才基金、国防科技预研基金资助的课题 .

10^{16} cm^{-3} , 源、漏区的掺杂浓度为 $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, 在工艺上一般采用离子注入 N_2 后高温 (1400°C) 退火来实现, 器件的有效沟道长度为 $1.5 \mu\text{m}$, 栅氧化层厚度为 $0.025 \mu\text{m}$, 固定界面态密度为 $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$, 源、漏结深为 $0.34 \mu\text{m}$, 采用多晶硅栅.

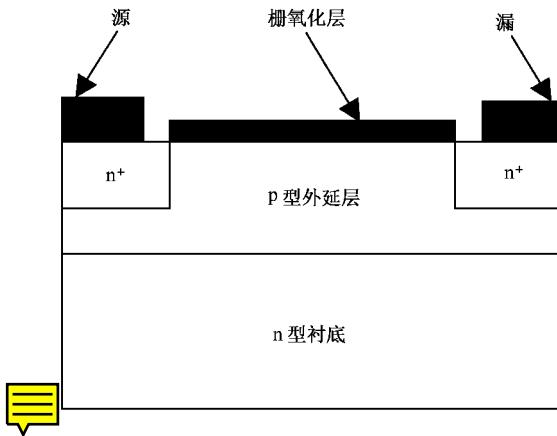


图 1 MOSFET 的横截面图

要想获得精确的模拟结果, 模型的选取十分重要. 由于 SiC 材料独特的物理性质和化学性质, 仅用一般的漂移-扩散模型已不能满足要求, 因此在模拟过程中必需加入新的模型. 迁移率和离化率是影响 SiC 特性的主要因素. 在低场条件下, 迁移率和掺杂浓度密切相关, 再考虑到温度对迁移率的影响, 我们采用 ANALYTIC 模型; 高场条件下, SiC 有着与电场相关的较高的饱和漂移速度^[6], 考虑到饱和速度对迁移率的影响, 我们采用 FLDMOB 模型(也就是 Caughey-Thomas 表达式); 并选取了 SRFMOB2 模型, 此模型为表面增强型迁移率模型, 考虑了因声子散射和杂质散射造成的表面迁移率的下降; 另外, 模拟还考虑到了杂质的不完全离化、带宽和有效态密度随温度的变化、重掺杂引起的本征载流子浓度的变化、寿命随浓度的变化以及 Shockley-Read-Hall 和 Auger 复合等.

在 4H-SiC MOSFET 的模拟中, 最主要的参数是禁带宽度、本征载流子浓度、迁移率和离化系数等, 我们使用的数值尽可能来自最新的文献. 我们采用了 MEDICI 中提供的耦合算法(Newton 's Method)来求解模型中的基本方程. MEDICI 中提供了两种算法来求解微分方程: 耦合算法和非耦合算法(GUMMEL 's METHOD). 虽然耦合算法比较花费机时和内存, 但其结果最为可靠.

3. 结果与讨论

根据上面的器件结构和选取的模型, 我们对 4H-SiC MOSFET 的器件结构参数对特性的影响进行了分析, 并系统研究了器件的温度特性.

3.1. MOSFET 结构参数的影响

器件中的载流子浓度直接影响到器件的各种电特性参数, 而载流子浓度主要由掺杂浓度来决定, 因此, 对不同掺杂浓度的器件特性进行模拟是必要的. 器件的阈值电压、跨导、漏极饱和电流和掺杂浓度的变化关系如表 1 所示.

表 1 掺杂浓度对电学参数的影响 ($V_{DS} = 30\text{V}$)

浓度/ cm^{-3}	2×10^{15}	2×10^{16}	2×10^{17}	2×10^{18}
阈值电压 V_T/V	0.4	0.8	2.8	16
跨导 $g_m/(\text{ms/mm})$	67.5	62.5	17.5	0.5
饱和漏电流 $I_{ds}/(\text{A}/\mu\text{m})$	2.9×10^{-3}	2.8×10^{-3}	2.4×10^{-3}	1.3×10^{-3}

当掺杂浓度从 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 增大到 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 其阈值电压从 0.4V 增大到 16V, 对于最大跨导其值从 67.5ms/mm 减小到 0.5ms/mm, 饱和电流在浓度从 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 增大到 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时的变化并不是很大, 但当掺杂为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时其值有明显的减小, 这可能是因为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 已接近重掺杂, 因此会引起重掺杂效应, 使得沟道载流子浓度减小, 漏电流明显减小, 跨导明显减小, 而阈值电压明显增大, 这和 Reinhold Schorner 等人^[7]的实验结果趋势是一致的. Reinhold Schorner 等人制造的 SiC MOSFET 栅长为 $25 \mu\text{m}$, 在掺杂浓度为 10^{15} cm^{-3} 时, 阈值电压为 2V, 掺杂浓度为 10^{16} cm^{-3} 时, 阈值电压达到 3.7V, 当掺杂浓度增加到 $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 时, 阈值电压增加到 5.2V, 可以看出器件的阈值电压在掺杂浓度超过 10^{16} cm^{-3} 时, 变化明显, 这和模拟结果一致.

表 2 沟道长度对电学参数的影响

沟道长度/ μm	0.5	1.0	1.5	2.0
阈值电压 V_T/V	0.4	0.6	0.8	0.8
跨导 $g_m/(\text{ms/mm})$	100	87.5	62.5	50
饱和漏电流 $I_{ds}/(\text{A}/\mu\text{m})$	4.8×10^{-3}	3.6×10^{-3}	2.8×10^{-3}	2.5×10^{-3}

沟道长度也是一个影响器件电学特性的重要参数. 表 2 显示了沟道长度对器件特性的影响. 从表 2 可以看出, 当沟道长度缩短到 $1 \mu\text{m}$ 以下时, 其阈值

电压减小.这是因为出现了短沟道效应,阈值电压出现了漂移.此时的沟道长度可以和漏结和源结的耗尽层宽度相比.此时的器件成为短沟道器件,器件的特性将不能用一维理论进行分析,沟道电势分布变成两维分布,必须求解两维的泊松方程.

氧化层的厚度直接影响器件的栅电极对半导体表面的状态的控制灵敏度.表3是氧化层厚度对阈值电压的影响关系.可以看出阈值电压随着氧化层厚度的增大而增大,跨导随着厚度的增大而减小,饱和电流随着厚度的增大而增大.若从器件的电学参数考虑,栅氧化层越薄,栅电容 C_{ox} 越大,栅极的控制灵敏度越高,器件的特性越好,但栅氧化层过薄,容易出现针孔现象,通常选用的栅氧化层厚度为15.0—35.0nm.

表3 氧化层厚度对电学参数的影响

氧化层厚度/nm	10.0	25.0	35.0	45.0
阈值电压 V_T/V	0.21	0.8	1.0	1.21
跨导 $g_m/(\text{ms/mm})$	150	62.5	50	40
饱和漏电流 $I_{dss}/(\text{A}/\mu\text{m})$	2.5×10^{-3}	2.8×10^{-3}	3×10^{-3}	3.2×10^{-3}

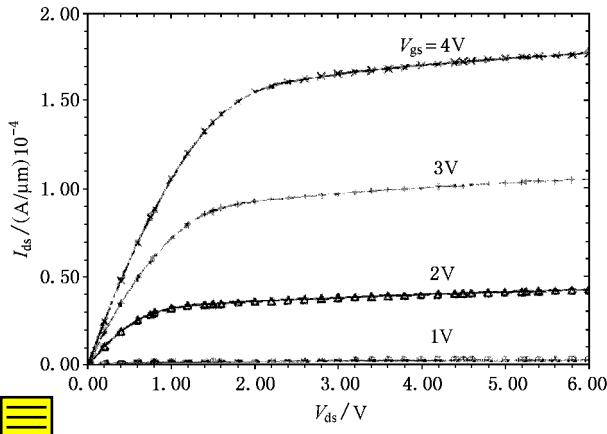


图2 MOSFET的输出特性图

3.2. MOSFET 温度特性的模拟

温度为300K时4H-SiC MOSFET的输出特性如图2.在 $V_{gs} = 0V$ 时,MOSFET的漏电流也为0(输出曲线与横坐标重合),说明此时器件表面不存在导电沟道,处于“截止状态”.在 $V_{gs} = 1V$ 时,出现漏电流,由此可知300K时器件的阈值电压小于1V.图3是温度从250K到700K变化时,器件的饱和漏电流(I_{dss})随温度的变化曲线.在800K时,模拟结果显示器件还具有良好的输出特性.图3中,饱和漏电流随

温度的升高先增大,后减小,这是杂质的电离率随温度升高而增大和迁移率随温度的升高而减小所共同决定的.由于SiC杂质能级较深,室温下杂质不完全电离,随着温度的升高,SiC的电离率升高,导致器件体内载流子浓度增大,从而在一方面使得漏电流增大.另一方面,SiC的迁移率随温度升高而降低,使得漏电流降低.这两方面共同作用的结果使得SiC MOSFET的漏电流随温度升高先增加,在一定的温度达到最大值,然后逐渐下降.

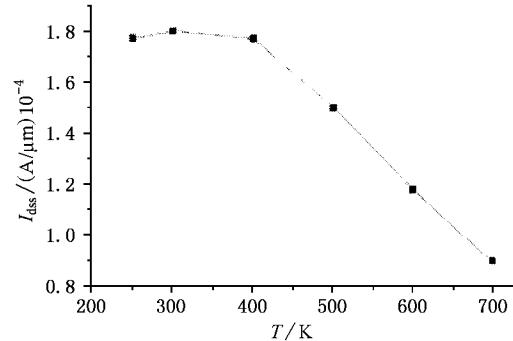


图3 饱和漏电流随温度的变化图

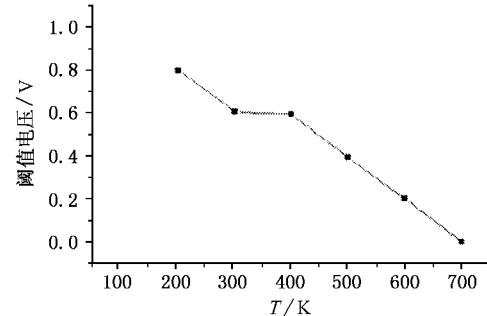


图4 阈值电压随温度的变化图

图4是阈值电压随温度的变化关系.在300K和400K之间,阈值电压的变化很小,但温度高于400K时,阈值电压随温度的升高变化较大,在400K时阈值电压为0.6V,到700K时,阈值电压几乎为0.这和饱和漏电流的变化趋势是一样的.阈值电压的变化趋势与文献[7]是一致的.

$V_{ds} = 20V$ 时跨导随温度的变化如图5所示.在温度低于450K时,跨导随温度的变化较小,温度为400K时,4H-SiC MOSFET器件的跨导值约为50ms/mm.

图6是 $V_{gs} = 3V$ 时器件导通电阻的温度特性图.导通电阻的值随温度的升高先减小后增大,这就

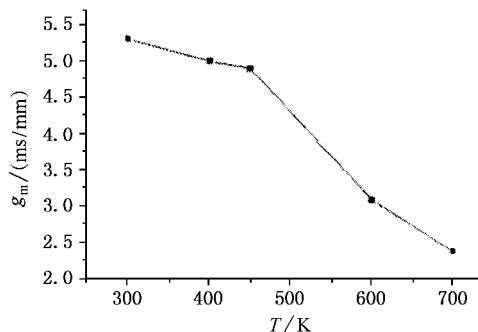


图5 跨导随温度的变化图

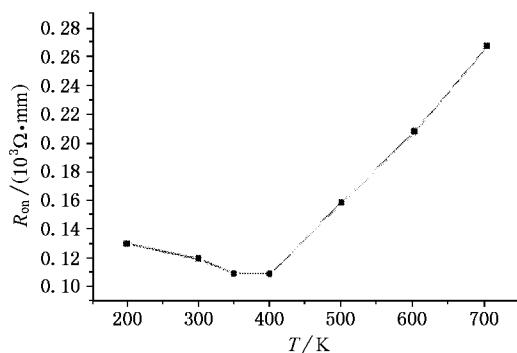


图6 导通电阻随温度的变化图

是因为在 200—400K 之间,杂质还处于电离阶段,所以其在体内载流子浓度值增大,电流值也相应地增大,表现为电阻减小,在温度大于 400K 时,迁移率的减小占主要的地位,迁移率的减小导致电流的减小,电阻值增大.

在 SiC 材料的温度特性中,温度的变化会导致杂质离化率、载流子迁移率、载流子饱和漂移速度、

材料热导率的变化,而这些材料特性的变化又影响到器件的电特性使之随温度变化.表 4 综合列出了温度上升时材料、器件特性随温度的变化情况.

表 4 SiC 材料、器件的温度特性

材料特性	温度升高	V_T	g_m	I_{dss}	R_{on}	V_B
杂质离化率	↑	↑	↑	↑	↑	↑
饱和漂移速度	↓	↓	↓	↓	↓	N/A
载流子迁移率	↓	↓	↓	↓	↓	↓
材料热导率	↓	↓	↓	↓	↓	↓

4. 结 论

本文设计了一个 4H-SiC MOSFET 的结构模型,用二维器件仿真软件 MEDICI 对器件的结构参数对器件特性的影响进行了研究,并对其输出特性和温度特性等进行了模拟.研究结果表明器件的结构参数对特性的影响很大,阈值电压、跨导和饱和漏电流随沟道长度的增加而分别增大、减小和减小,随栅氧化层厚度的增加而分别增大、减小和增大,随沟道掺杂浓度的增大而分别增大、减小和减小,在重掺杂时,变化明显,表明重掺杂效应对器件的特性影响很大;由于离化率和迁移率的影响 4H-SiC MOSFET 的漏电流随温度升高先增大,在一定的温度达到最大值,然后逐渐下降,模拟显示器件在 800K 时还具有良好的输出特性;阈值电压和跨导随温度上升而下降,导通电阻的值随温度的升高先减小后增大.这些结果对于 SiC 器件的结构设计和制造具有重要的指导意义.

- [1] Ryu S H, Kornegay K T et al 1998 *IEEE Trans. Electron Devices* **45** 45
- [2] Slater D B, Lipkin L A Jr, Johnson G M et al 1995 *Proceedings of International Conference on SiC and Related Materials* (Kyoto Japan 9.1995) pp18-21,
- [3] Chatty K, Banerjee S, Chow T P et al 2000 *IEEE Electronic Device Letters* **21**(7) 356
- [4] Agarwal A K, Casady J B, Rowland L B, Valek W F and Brandt C D 1998 *Materials Science Forum* **264-268** 989
- [5] Technology Modeling Associates Inc. MEDICI Two-Dimensional Device Simulation Program Version 2.3 Users' Manual : Vol 2 [Z] (California :Technology Modeling Associates ,Inc) 1997
- [6] Shang Y C et al 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1786 (in Chinese) 尚也淳等 2000 *物理学报* **49** 1786]
- [7] Schorner R, Friedrichs P and Peters D 1999 *IEEE Trans. Electron Devices* **46**(3) 533

Study on the temperature properties of 4H-SiC MOSFET *

Xu Chang-Fa Yang Yin-Tang Liu Li

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

(Received 27 July 2001 ; revised manuscript received 12 September 2001)

Abstract

The device structure and temperature properties of 4H-SiC MOSFET have been studied. The influence of the device's structure parameter on its properties is summarized. The properties are compared at different temperatures and the variations of saturation drain current ,threshold voltage ,transconductance ,on-resistance with temperature are presented. Simulation results show that 4H-SiC MOSFET can operate at 800K with excellent temperature properties.

Keywords : 4H-SiC , MOSFET

PACC : 7280 , 5701 , 5841

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No.69976023),the Trans-Century Training Program Foundation for Talents from the Ministry of Education of China and the Advanced Defense Technology Foundmental Research Foundation , China.