

6H-SiC 肖特基源漏 MOSFET 的模拟仿真研究^{*}

王 源 张义门 张玉明 汤晓燕

(西安电子科技大学微电子研究所 , 西安 710071)

(2002 年 12 月 31 日收到 2003 年 2 月 12 日收到修改稿)

给出了一种新型 SiC MOSFET——6H-SiC 肖特基源漏 MOSFET, 这种器件结构制备工艺简单, 避免了长期困扰常规 SiC MOSFET 的离子注入工艺难度大、退火温度高、晶格损伤大、注入激活率低等问题。分析了该器件的电流输运机理, 并通过 MEDICI 模拟, 给出了 SiC 肖特基源漏 MOSFET 伏安特性以及其和金属功函数、栅氧化层厚度和栅长关系。

关键词: 碳化硅, 肖特基接触, MOSFET, 势垒高度

PACC: 7280, 7330, 7340S, 7220

1. 引 言

碳化硅作为一种新型的半导体材料, 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的特点, 在高温、高频、大功率及抗辐射等方面具有巨大的应用潜力。对于 VLSI 电路而言, MOSFET 是一种极其重要的器件, 由于目前大多数 SiC MOSFET 均采用离子注入形成源漏区, 不仅离子注入的工艺难度较大, 而且需要在 1500—1600℃ 高温退火下处理, 容易引入晶格缺陷, 而离子注入后的杂质激活率一般低于 10%, 加上在常温下杂质不能完全离化, 这些都会使源漏区的电阻变大, 沟道的载流子迁移率下降, 跨导变小, 严重影响了 MOSFET 的性能^[1,2]。为了解决这一问题, 我们提出了一种新型 SiC MOSFET 结构——6H-SiC 肖特基源漏 MOSFET (Schottky Barrier Source/Drain Metal-Oxide Transistor, SBSD-MOSFET)。

1968 年 Lepselter 和 Sze^[3] 第一次提出了用肖特基接触代替高掺杂 p-n 结做源漏接触的 SBSD-MOSFET 结构。这种 MOS 结构利用肖特基接触有效地减小了在器件尺寸大幅度降低时困扰常规 MOSFET 的短沟效应。Tucker 等人^[4] 研究表明, 对于硅器件, SBSD-MOSFET 已经可以将器件的沟长降至 30nm 左右。对于 VLSI 而言, 这是十分鼓舞人心的。但是硅器

件由于形成肖特基接触的材料功函数的限制, 使这种结构在实现 p 沟 MOSFET 方面存在着困难。而碳化硅材料的禁带宽度较大, 形成肖特基源漏的电极材料就可以有较大的选择余地。此外用肖特基形成 MOSFET 的源漏, 其工艺比离子注入工艺简单得多, 不会对材料的晶格产生影响, 有利于改进器件的特性, 这将为 SiC MOSFET 器件和大规模集成电路设计开辟新的途径。目前尚未有 SiC 肖特基源漏 MOSFET 的相关报道。

2. 器件结构

对于常规 MOSFET, 随着沟道长度的减小, 源漏区的耗尽层宽度变得可以与沟道长度比拟, 此时沟道中的电势分布变为二维分布(受栅压控制的横向电场 E_x 和受漏压控制的纵向电场 E_y), 缓变沟道近似(即 $E_x > E_y$)不再成立, 短沟效应出现, 亚阈特性变差, 从而器件性能变坏^[5]。为了消除短沟效应, 一个超薄、高电导的源漏结是十分必要的, SBSD-MOSFET 就是基于这样的考虑提出的。与常规 MOS 不同, SBSD-MOSFET 用肖特基金属代替了高掺杂的 p-n 结做 MOSFET 的源漏。图 1 给出了 6H-SiC SBSD-MOSFET 的结构图, 栅氧化物为 SiO_2 , 源漏区的肖特基接触的金属为 Ti, 栅极金属为 Au。在源漏区接触和栅极之间需要用 SiO_2 隔离开来, 以避免栅源和栅漏之

* 国家自然科学基金(批准号: 60276047) 和国家重点实验室基金(批准号: 51432050101DZ01) 资助的课题。

间短路。

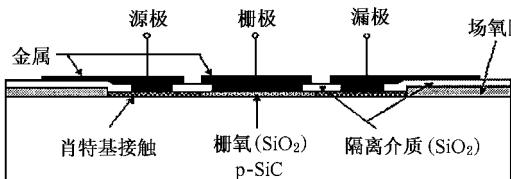


图 1 6H-SiC SBSD-MOSFET 结构图

对于 6H-SiC SBSD-MOSFET, 金属源漏区接触的高电导性使源漏串联电阻减至最小, 避免了常规 MOSFET 中 p-n 结源漏所需的重掺杂; 肖特基接触的源漏有效地将结深做到零; 棚压和源漏区的肖特基势垒决定了沟道中的电势, 衬底的掺杂可以降得较低。制备工艺十分简单, 源漏区的制备避免了常规 SiC MOSFET 所需的离子注入和高温退火, 同时避免了高温退火时所造成的晶格缺陷, 大大改善了 SiC MOSFET 的特性。

3. 6H-SiC 的肖特基接触

根据 SBSD-MOSFET 的结构特点, 可以将其看作是两个背靠背的肖特基二极管。源漏区肖特基接触界面的特性和常规肖特基二极管相似。图 2 给出了肖特基势垒接触的能带图。 ξ 和 X_ξ 分别是能量的大小和其在半导体中所处的位置。 $q\Phi_B$ 为势垒高度。流过肖特基势垒的净电流由两部分组成, 即由金属流

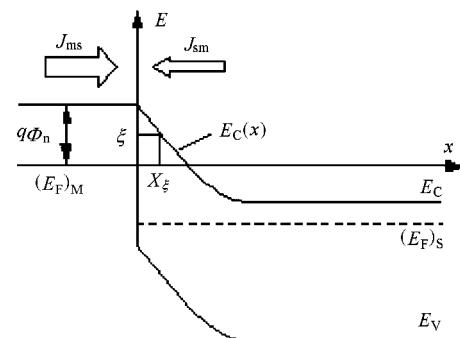


图 2 6H-SiC 肖特基势垒的能带图

向半导体的电流 J_{ms} 和由半导体流向金属的电流 J_{sm} :

$$J_{ms} = -\frac{A^* T}{k} \int_0^\infty f_m(\xi) [1 - f_s(\xi)] |T(\xi)| d\xi, \quad (1)$$

$$J_{sm} = -\frac{A^* T}{k} \int_0^\infty f_s(\xi) [1 - f_m(\xi)] |T(\xi)| d\xi, \quad (2)$$

式中 $f_m(x)$ 和 $f_s(x)$ 分别是金属和半导体的 Fermi-Dirac 分布函数, $|T(x)|$ 为势阱中电子的隧穿概率, A^* 为理查逊常数, T 为器件温度, k 为波尔兹曼常数。而 J_{ms} 和 J_{sm} 均包含了电子的热发射和隧穿效应两种机理导致的电流大小。由上式可知 J_{ms} 大小正比于势阱中电子的隧穿概率乘以电子在金属中的占据概率和在半导体中的未占据概率。考虑 WKB 近似条件, 势阱中电子的隧穿概率 $|T(x)|$ 可以表示为

$$|T(\xi)| = \begin{cases} 1 & \xi > \Phi_B, \\ \exp\left(-\frac{4\pi}{h} \int_0^{\xi} (2m^* [E_c(x) - \xi])^{1/2} dx\right) & 0 < \xi < \Phi_B, \end{cases} \quad (3)$$

其中 m^* 是电子的有效质量, 6H-SiC 的 $m^* = 0.6m_0$ 。

运用 Avant! 公司的 MEDICI 软件对不同金属和 6H-SiC 金半接触的能带结构进行了模拟。MEDICI 中对于肖特基接触模型作了一定的定义:

$$\Psi_s = \chi_s + \frac{E_g}{2q} + \frac{kT}{2q} \ln\left(\frac{N_c}{N_v}\right) - W_M + V_{\text{applied}}, \quad (4)$$

$$J_{\text{surf}n} = qv_{sn}(n_{\text{surf}} - n_{\text{eq}}), \quad (5)$$

$$J_{\text{surf}p} = qv_{sp}(p_{\text{surf}} - p_{\text{eq}}), \quad (5)$$

$$v_{\text{surf}n} = \frac{A_n^* T^2}{qN_c}, \quad v_{\text{surf}p} = \frac{A_p^* T^2}{qN_v}, \quad (6)$$

$$\Phi_{Bn} = W_M - \chi_s, \quad \Phi_{Bp} = \frac{E_g}{q} + \chi_s - W_M. \quad (7)$$

模型中 Ψ_s 为肖特基接触处的表面势, $J_{\text{surf}n}$, $J_{\text{surf}p}$ 分别为接触处电子和空穴电流密度, $v_{\text{surf}n}$, $v_{\text{surf}p}$ 是电子和空穴的表面复合速度, Φ_{Bn} , Φ_{Bp} 是 n 型和 p 型半导体的势垒高度。此外, 式中 χ_s 为半导体的亲合势, E_g 为半导体的禁带宽度, N_c , N_v 是半导体的导带底和价带顶的有效态密度, W_M 为金属的功函数, V_{applied} 为外加偏压, n_{surf} , p_{surf} 分别是表面处的电子和空穴浓度, n_{eq} , p_{eq} 是体内的电子和空穴浓度, A_n^* , A_p^* 是考虑了隧穿效应的电子和空穴有效理查逊常

数. 对于 6H-SiC, 相应的各个参数分别为^[6] $\chi_s = 3.8V$, $E_g = 3.0eV$, $N_c = 2.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $N_v = 1.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $A_n^* = 110 \text{ A} \cdot \text{K}^{-2} \cdot \text{cm}^{-2}$, $A_p^* = 30 \text{ A} \cdot \text{K}^{-2} \cdot \text{cm}^{-2}$.

4. SBSD-MOSFET 的电流输运机制

SBSD-MOSFET 的电流输运满足以下方程:

$$I = \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} \left[(V_G - V_T) (V_D - V_S) - \frac{(V_D - V_S)^2}{2} \right], \quad (8)$$

$$I = AA^* T^2 e^{-\frac{\Phi_B}{kT}} (1 - e^{-\frac{qV_S}{kT}}), \quad (9)$$

其中 A 为有效注入面积, Φ_B 为源区有效势垒高度, V_S 为源极偏压, C_{ox} 为氧化层电容. 图 3 给出了不同

的偏压下 SBSD-MOSFET 在半导体表面处的能带结构.

当栅压 V_G 和漏压 V_{DS} 均为零偏时, 源漏区均有高度为 $q\Phi_{Bp}$ 的肖特基势垒, 阻碍载流子流动, 如图 3 (a) 所示. 增大漏压 V_{DS} , 能带发生弯曲, 器件仍然处于关态, 电子主要靠热发射越过肖特基势垒进入沟道, 如图 3 (b) 所示. 如果漏压 V_{DS} 为零, 当栅压 V_G 大于开启电压 V_T , p 型半导体的表面将会反型成 n 型, 引起能带弯曲, 势垒高度相应变为 $q\Phi_{Bn}$, n 型沟道出现, 能带结构如图 3 (c) 所示. 此时增加漏压 V_{DS} 到足够大时, 使得势垒宽度变窄, 电子的输运开始主要以隧道效应为主, 电子通过源极变得很薄的肖特基势垒, 穿过反型的 n 型沟道, 流向漏区, 形成电流, 如图 3 (d) 所示.

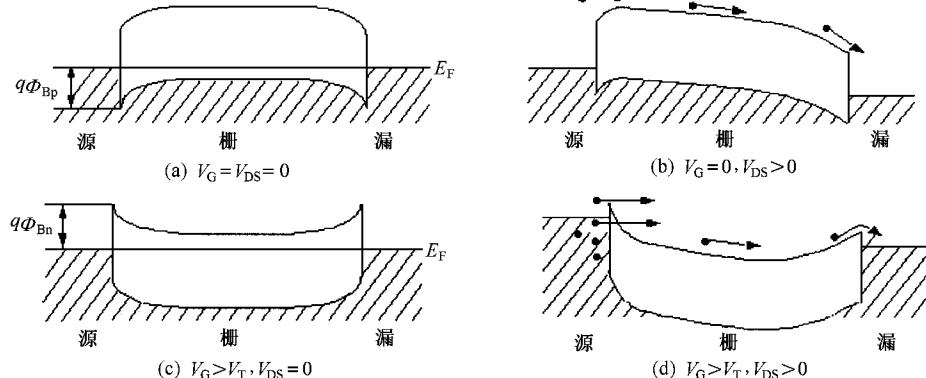


图 3 6H-SiC SBSD-MOSFET 能带结构图

5. 模拟结果

通过 MEDICI 软件, 我们对 n 沟 6H-SiC SBSD-MOSFET 进行了仿真模拟. 图 4 给出了栅长为 $1\mu\text{m}$,

栅氧厚度为 20nm , 衬底掺杂浓度为 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 的 6H-SiC SBSD-MOSFET 的伏安特性. 由图可知, 栅压 $V_{GS} = 5\text{V}$, 器件的饱和电流 $I_{Dsat} = 496\mu\text{A}/\mu\text{m}$, 器件的开启电压 V_T 约在 0.5V 左右.

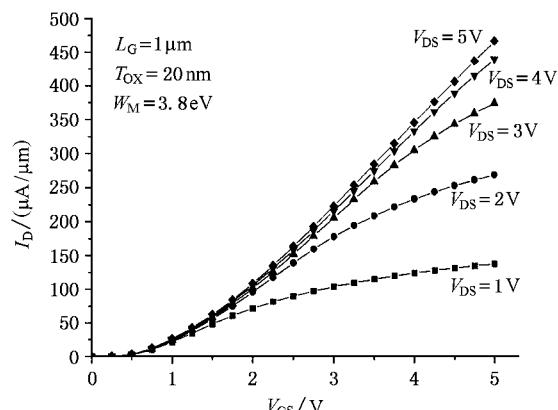
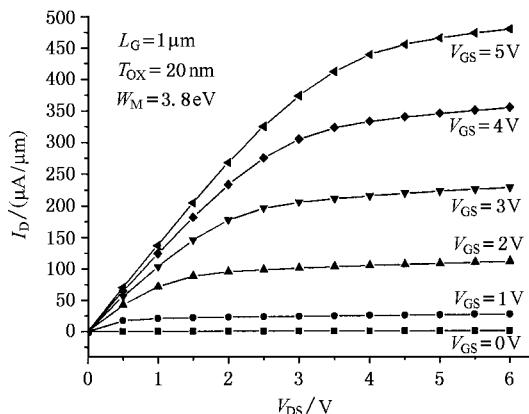


图 4 6H-SiC SBSD-MOSFET 的伏安特性

肖特基势垒的高度,对于隧道电流的大小有着重要的影响,而影响肖特基势垒高度的因素包含了源漏区所选用金属的功函数,不同金属功函数对于器件伏安特性的影响如图5所示。功函数增加,漏极电流随之减小,比较适合的功函数大约在3.8eV左右,此时漏极电流的大小大约为300—500 μ A/ μ m,当

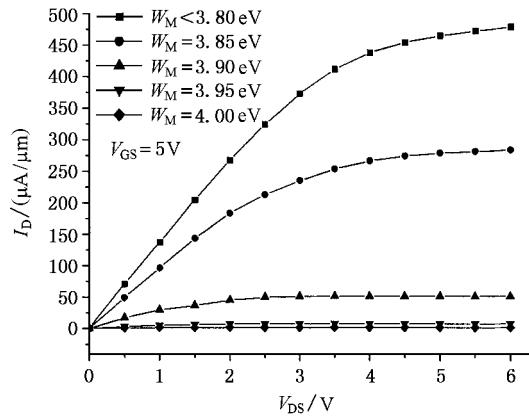


图5 不同金属功函数下6H-SiC SBSD-MOSFET的I-V特性

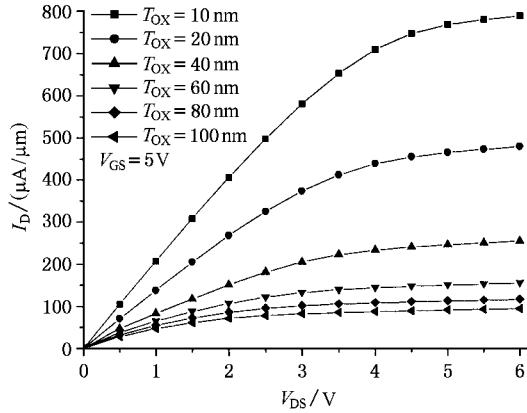


图6 不同栅氧厚度下6H-SiC SBSD-MOSFET的I-V特性

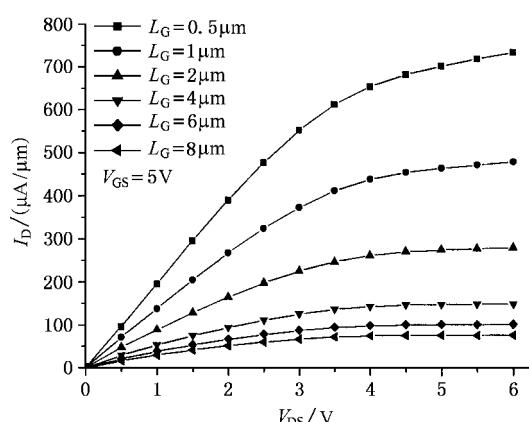
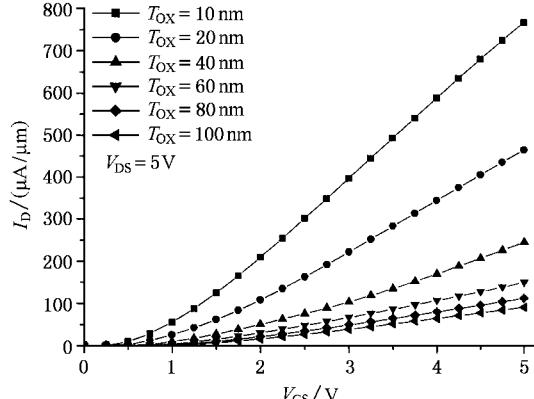


图7 不同栅长下6H-SiC SBSD-MOSFET的I-V特性

势垒高度小于3.8eV时,功函数的变化对于漏极电流不再有显著影响,造成这种现象的原因是由于金属功函数越大,势垒高度越高,电子穿过势垒的概率就越小,从而导致驱动电流减小,而金属功函数过小,势垒高度越低,肖特基势垒对于电流的影响就越越来越小,驱动电流的大小逐渐对于金属功函数不太敏感。

图6给出了不同栅氧厚度 T_{ox} 对于SBSD-MOSFET特性的影响。由图中可知, $V_{GS}=5$ V,当栅氧厚度 $T_{ox}=10$ nm时, $I_{Dsat}=789\mu$ A/ μ m;而 $T_{ox}=100$ nm时, $I_{Dsat}=95\mu$ A/ μ m。同样的 $T_{ox}=10$ nm时, $V_T=0.5$ V,而 $T_{ox}=100$ nm时, $V_T=1$ V。漏极饱和电流和开启电压随着栅氧厚度的增加而发生相应的变化,漏极饱和电流越来越小,开启电压越来越大。造成这种变化趋势的原因是由于随着栅氧厚度的增加,对于沟道的控制能力越来越弱,栅氧厚度越厚,沟道越难反型,器件越不易打开,开启电压也就越大,漏极饱和电流也会逐渐减小。



SBSD-MOSFET的最大优势在于小尺寸器件消除了短沟效应。通过MEDICI,我们对不同栅长的器件进行了模拟。图7中可以看出,对于SBSD-MOSFET而言,当栅长减至0.5 μ m时,器件依旧保持着较好的伏安特性。随着栅长的增加, I_{Dsat} 随之减小,这是由于栅长越长,沟道导通的难度越大,载流子输运的路径越长,从而驱动电流也就越小。

6. 结论

本文给出了一种新型的SiC MOSFET结构——6H-SiC SBSD-MOSFET。利用两个背靠背的肖特基结

代替重掺杂的 p-n 结做源漏 ,SBSD-MOSFET 成功的避免了长期困扰常规 SiC MOSFET 的离子注入难度大 退火温度高 晶格缺陷大 注入激活率低的问题 . 对于 VLSI 和 SiC MOSFET 器件而言 ,SBSD-MOSFET 具有十分良好的发展前景 . 本文利用 MEDICI 软件对于该结构进行了模拟 ,SBSD-MOSFET 拥有和常规

SiC MOSFET 相当的驱动电流 . 此外 , 不同的栅氧厚度、金属功函数和栅长对于器件的特性有着较大的影响 . 对于 n 沟 6H-SiC MOSFET , 为了获得较好的驱动电流 , 选择金属功函数大约在 3.8eV 左右的金属 , 考虑击穿 , 栅氧的厚度大约在 20nm—50nm 之间 , 此时 SBSD-MOSFET 可获得较优的特性 .

[1] Wang S G , Zhang Y M and Zhang Y M 2003 *Chin . Phys .* **12** 89

[2] Tang X Y , Zhang Y M and Zhang Y M 2002 *Acta Phys . Sin .* **51** 771 (in Chinese) [汤晓燕、张义门、张玉明 2002 物理学报 **51** 771]

[3] Lepeselter M P and Sze S M 1968 *Proc . IEEE* **56** 1400

[4] Tucker J R , Wang C and Carney P S 1994 *Appl . Phys . Lett .* **65** 618

[5] Sze S M 1981 *Physics of Semiconductor Devices 2nd Ed* (New York : Wiley) p469

[6] Ruff M , Mitlehner H and Helbig R 1994 *IEEE Trans . Elec . Dev .* **41** 1040

A simulation study of 6H-SiC Schottky barrier source/drain MOSFET *

Wang Yuan Zhang Yi-Men Zhang Yu-Ming Tang Xiao-Yan

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

(Received 31 December 2002 ; revised manuscript received 12 February 2003)

Abstract

A novel SiC metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (SiC SBSD-MOSFET) with Schottky barrier contacts for source and drain is presented in this paper. This kind the device gives a fabrication advantage of avoiding the steps of ion implantation and annealing at high temperatures of the conventional SiC MOSFET. Also It has no problems of crystal damage caused by ion implantation and low activation rate of implanted atoms. The operational mechanism of this device is analyzed and its characteristics are comparable to the conventional SiC MOSFET from the simulation with MEDICI. The effects of different metal workfunctions , oxide thickness , and gate length on the device performance are discussed .

Keywords : silicon carbide , Schottky contact , MOSFET , barrier height

PACC : 7280 , 7330 , 7340S , 7220

* Project supported by the National Nature Science Foundation of China (Grant No. 60276047) and the Key Laboratory Foundation of China (Grant No. 51432050101DZ01).