

碳化硅混合 PiN/Schottky 二极管的二维模拟

牛新军 张玉明 张义门 吕红亮

(西安电子科技大学微电子研究所, 西安 710071)

摘要: 利用模拟软件 MEDICI 对碳化硅混合 PiN/Schottky 二极管(MPS)的输运机理及伏安特性进行了模拟。输运机理的模拟结果表明 MPS 的工作原理是正向肖特基起主要作用, 而反向时 PN 结使漏电流大大减小。伏安特性的模拟结果表明 MPS 的正向压降小, 电流密度大, 在 2V 正向偏压下达到 $10^{-5} \text{ A}/\mu\text{m}$, 反向漏电流小, 击穿电压高(2000V 左右), 可以通过改变肖特基和 PN 结的面积比来调整 MPS 的性能, 与硅 MPS、碳化硅 PN 结以及碳化硅肖特基二极管相比具有明显的优势, 是理想的功率整流器。

关键词: 碳化硅; MPS; 二维模拟; MEDICI; 输运机理; 伏安特性

EEACC: 2560H; 2560B; 2520M

中图分类号: TN311⁺.7

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2002)05-0517-06

1 引言

Baliga 为了改善高压硅整流器的正向和反向特性提出了 MPS 结构。MPS 结构将 PN 结集成在肖特基结构中, 在反向应用时 PN 结的耗尽区将肖特基界面屏蔽于高场之外, 基本消除了肖特基势垒降低效应, 使反向漏电流大大减小, 而正向导电性仍然由肖特基接触决定。

碳化硅材料的优异性能, 如高击穿电场、大的电子饱和漂移速度、小的介电常数、较高的电子迁移率和大的热导率, 使碳化硅成为小功率损耗和尺寸的功率器件的有力竞争者。因为碳化硅击穿电场比硅大十倍, 所以在碳化硅材料的 MPS 结构, 漂移区可以有相对较高的掺杂浓度和较小的厚度, 不但可以使器件的串联电阻大大降低, 而且使少数载流子注入带来的影响很小, 更有利于获得高压快速整流器。

碳化硅 MPS 器件具有高速、高击穿电压、低漏电流和低正向压降等优点, 在功率系统中有很好的应用前景。为了进一步优化碳化硅 MPS 的设计, 有必要对碳化硅 MPS 的工作机理进行仔细地分析,

而且它的特殊工作机理决定了我们必须对它进行二维分析, 但是 PN 结和肖特基的混合结构给分析造成了很大的困难, 所以本文将采用二维数值方法, 利用 MEDICI 来模拟 4H-SiC MPS 的输运机理、伏安特性, 以及肖特基和 PN 结的面积比对器件性能的影响, 并与硅 MPS、碳化硅 PN 结以及碳化硅肖特基二极管的性能进行比较, 证明碳化硅材料和 MPS 结构的优越性。

2 器件模型及模型参数

2.1 漂移-扩散模型

漂移-扩散模型主要由三组方程组成: (1) 泊松方程(Poisson's equation) (2) 载流子连续性方程(continuity equation) (3) 载流子输运方程(carrier transport equation)。

$$\epsilon \nabla^2 \Psi = -q(p - n + N_D^+ - N_A^-) - \rho_s \quad (1)$$

其中 Ψ 是电势; ϵ 是介电常数; n 和 p 为电子和空穴密度; q 为电子电量; N_D^+ 和 N_A^- 分别为电离的施主和受主杂质浓度; ρ_s 为表面电荷浓度。

牛新军 男, 1977 年出生, 硕士研究生, 从事碳化硅 MPS 的研究。

张玉明 男, 1965 年出生, 教授, 从事新型半导体器件、TCAD 和 VLSI CAD 的教学和科研工作, 目前主要研究碳化硅器件的器件物理、工艺、模型和模拟。

2001-07-31 收到, 2001-11-09 定稿

©2002 中国电子学会

$$\begin{aligned}\frac{\partial n}{\partial t} &= \frac{1}{q} \nabla \cdot \vec{J}_n - U_n = F(\psi, n, p) \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= -\frac{1}{q} \nabla \cdot \vec{J}_p - U_p = F(\psi, n, p)\end{aligned}\quad (2)$$

其中 J_n 和 J_p 分别为电子和空穴电流密度; U_n 和 U_p 分别为电子和空穴的净复合几率.

$$\begin{aligned}\vec{J}_n &= -q\mu_n n \nabla \phi_n \\ \vec{J}_p &= -q\mu_p p \nabla \phi_p\end{aligned}\quad (3)$$

其中 μ_n 和 μ_p 分别为电子和空穴的迁移率.

2.2 迁移率模型

MEDICI 中提供的迁移率模型可以分为三大类: 低场迁移率模型、高场迁移率模型、水平场迁移率模型. 各大类中又细分为许多不同的迁移率模型, 分别适用于不同的情况. 我们在仿真模拟过程中, 根据工作目的的需要, 进行了如下选择:

(1) 在低场条件下, 迁移率与掺杂浓度密切相关. 另外, 我们在研究器件温度特性时, 必须考虑温度对迁移率的影响. 在 MODEL 语句中选区参数 ANALYTIC 便可启用相关模型.

$$\mu_{n0} = \mu_{min} + \frac{\mu_{max} \left(\frac{T}{300} \right)^{NUN} - \mu_{min}}{1 + \left(\frac{T}{300} \right)^{XIN} \left(\frac{N_{total}(x, y)}{NREFN} \right)^{\alpha}} \quad (4)$$

对于 4H-SiC, 取 $\mu_{min} = 0$, $\mu_{max} = 1020 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, $NUN = -2.4$, $NREFN = 1.5 \times 10^{17}$, $\alpha = 0.61$.

(2) 在高场情况下, 考虑到饱和速度对迁移率的影响, 选用相应的高场模型 FLDMOB (也就是 Caughey-Thomas expression).

$$\mu_n = \frac{\mu_{sn}}{\left[1 + \left(\frac{\mu_{sn} E_{n,n}}{V_n^{sat}} \right)^{\beta} \right]^{\frac{1}{\beta}}} \quad (5)$$

对于 4H-SiC, 取 $V_n^{sat} = 4.8 \times 10^7 \text{ m/s}$, $\beta = 2.0$.

2.3 部分电离模型

在 SiC 中, 由于杂质的电离能较大, 即使在高于常温下, 杂质也没有全部离化, 这类似于 Si 材料在低温下的“冻析”效应. 它与器件的电学参数性能有密切的联系, 在器件的分析和设计中必须加以考虑. 在 MEDICI 中, 在 MODEL 语句中选取 INCOM-PLE 参数, 利用费米分布求解电离方程, 可以模拟这一现象.

$$\begin{aligned}N_D^+ &= \frac{N_D}{1 + g_c \left(\frac{E_{FN} - E_D}{kT} \right)} \\ N_A^- &= \frac{N_A}{1 + g_v \left(\frac{E_A - E_{FP}}{kT} \right)}\end{aligned}\quad (6)$$

其中 g_c 和 g_v 分别是导带和价带简并度; E_D 和 E_A 分别为施主和受主杂质能级; E_{FN} 和 E_{FP} 分别是电子和空穴的费米能级. 对于 4H-SiC, 我们取 $g_c = 2$, $g_v = 4$.

2.4 肖特基接触模型

SiC 器件的研究和其他材料的器件一样, 首先碰到的问题就是金属-半导体接触. 在本文中, 我们利用 MEDICI 中的相关模型对肖特基接触进行了模拟与分析.

首先, 在 CONTACT 语句中定义 SURF. REC 参数, 得到有限表面复合速度. 然后定义相关参数, 模拟时考虑以下公式.

$$\Psi_s = \chi_{semi} + \frac{E_g}{2q} + \frac{kT}{2q} \ln \left(\frac{N_c}{N_v} \right) - W_m + V_{applied} \quad (7)$$

$$J_{sn} = qV_{sn}(n_s - n_{eq}) \quad (8)$$

$$J_{sp} = qV_{sp}(p_s - p_{eq}) \quad (8)$$

$$v_{sn} = \frac{A_n^*}{qN_c} T^2 \quad (9)$$

$$v_{sp} = \frac{A_p^*}{qN_v} T^2 \quad (9)$$

$$\Delta\Phi_b = \left(\frac{q}{4\pi\epsilon_{semi}} \right)^{\frac{1}{2}} E^{\frac{1}{2}} + \alpha E \quad (10)$$

其中 Ψ_s 为表面势; χ_{semi} 为半导体的亲和势; N_c 和 N_v 分别为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; J_{sn} 和 J_{sp} 分别为电子和空穴的表面复合电流密度; v_{sn} 和 v_{sp} 分别是电子和空穴的表面复合速度; n_s 和 n_{eq} 为表面和体内的电子浓度; p_s 和 p_{eq} 分别为表面和体内的空穴浓度; A_n^* 和 A_p^* 分别是电子和空穴的反映量子力学和隧道效应的 Richardson 常数; $\Delta\Phi_b$ 为镜像力和电偶极子引起的势垒高度降低量. 对于 4H-SiC, 我们取 $\chi_{semi} = 3.8 \text{ eV}$, $N_c = 2.49 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $N_v = 1.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $A_n^* = 146 \text{ A}/(\text{K} \cdot \text{cm})^2$, $A_p^* = 30 \text{ A}/(\text{K} \cdot \text{cm})^2$.

2.5 碰撞电离模型

碰撞电离的求解可以通过在 MODEL 语句中

指定 IMPACT.I 来实现。由碰撞电离引起的电子空穴对的产生率可由下式表示:

$$G^{\text{II}} = \alpha_{n,\text{ii}} \frac{|\vec{J}_n|}{q} + \alpha_{p,\text{ii}} \frac{|\vec{J}_p|}{q} \quad (11)$$

其中 $\alpha_{n,\text{ii}}$ 和 $\alpha_{p,\text{ii}}$ 分别为电子和空穴的碰撞电离系数; \vec{J}_n 和 \vec{J}_p 分别为电子和空穴的电流密度。而碰撞电离系数与局部电场有以下关系:

$$\alpha_{n,\text{ii}} = \alpha_{n,\text{ii}}^{\infty}(T) \exp\left[-\left(\frac{E_{n,\text{ii}}^{\text{crit}}(T)}{E_{n,\parallel}}\right)^{\text{EXN. II}}\right] \quad (12)$$

$$\alpha_{p,\text{ii}} = \alpha_{p,\text{ii}}^{\infty}(T) \exp\left[-\left(\frac{E_{p,\text{ii}}^{\text{crit}}(T)}{E_{p,\parallel}}\right)^{\text{EXP. II}}\right] \quad (13)$$

其中 $E_{n,\parallel}$ 和 $E_{p,\parallel}$ 分别是电流流动方向上的电场分量; $E_{n,\text{ii}}^{\text{crit}}(T)$ 和 $E_{p,\text{ii}}^{\text{crit}}(T)$ 是临界电场。

$$\begin{aligned} \alpha_{n,\text{ii}}^{\infty}(T) &= N.\text{IONIZA} + N.\text{ION.1} \times T \\ &\quad + N.\text{ION.2} \times T^2 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{p,\text{ii}}^{\infty}(T) &= P.\text{IONIZA} + P.\text{ION.1} \times T \\ &\quad + P.\text{ION.2} \times T^2 \end{aligned} \quad (15)$$

对于 4H-SiC, 我们取 $N.\text{IONIZA} = 2.5 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$, $P.\text{IONIZA} = 5.18 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$, EXN. II = 1.77 $\times 10^7 \text{ V/cm}$, EXN. II = 1, ECP. II = $1.4 \times 10^7 \text{ V/cm}$, EXP. II = 1, $N.\text{ION.1} = 0(\text{cm} \cdot \text{K})^{-1}$, $N.\text{ION.2} = 0(\text{cm} \cdot \text{K}^2)^{-1}$, $P.\text{ION.1} = 0(\text{cm} \cdot \text{K})^{-1}$, $P.\text{ION.2} = 0(\text{cm} \cdot \text{K}^2)^{-1}$ 。

3 模拟结果及分析

本文利用 MEDICI 对 MPS 整流器进行了二维模拟, 包括不同偏压情况下 4H-SiC MPS 的运输机理、4H-SiC 及 Si MPS 的伏安特性, 并进行了比较。

3.1 输运机理

以下对输运机理的模拟采用的结构和材料参数为 PN 结宽度 $2\mu\text{m}$, 肖特基区宽度 $2\mu\text{m}$, 外延层厚度 $10\mu\text{m}$, 掺杂浓度 10^{16}cm^{-3} , p^+ 区掺杂浓度 10^{18}cm^{-3} , 结深 $1\mu\text{m}$, 肖特基金属为镍(Ni)。

由图 1 可以看出, 在加 2V 正向偏压时, 肖特基势垒已经被拉平, 再由图 3 可知此时电流集中在肖特基区, 肖特基二极管已经完全开启, 而从图 2 的电场分布情况得出 PN 结也承受了一定的压降, 但图 3 中表明此时 PN 结仍然没有开启, 电流很小。MPS 的开启电压及正向电流密度主要由肖特基决定, 所以说在加正向偏压的情况下, MPS 结构中起主要作

用的是肖特基。

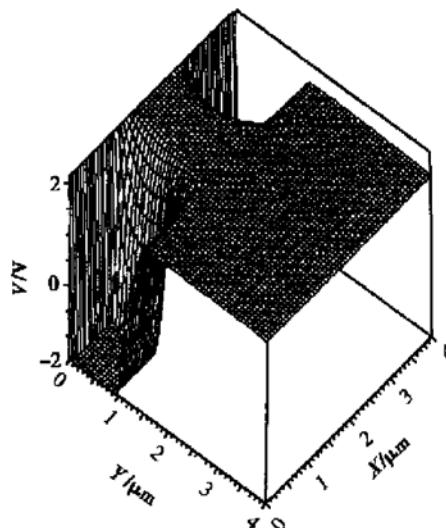


图 1 4H-SiC MPS 加 2V 正向偏压时体内的电位分布情况

Fig. 1 Potential distribution of 4H-SiC MPS applied 2V forward bias

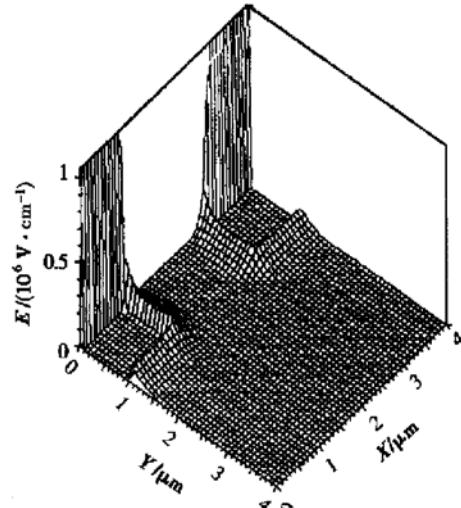


图 2 4H-SiC MPS 加 2V 正向偏压时体内的电场分布情况

Fig. 2 Electric field distribution of 4H-SiC MPS applied 2V forward bias

图 4 表明, 加足够高的反向偏压时(例如 400V), MPS 体内的电位分布情况接近于 PN 结, 从图 5 中可以看出 PN 结的耗尽区已将肖特基区夹断。由于 PN 结的作用, 使肖特基区的耗尽层宽度大得多, 大大减小了肖特基的漏电流, 如图 6 所

示, MPS 的反向特性比起肖特基有了很大的提高.

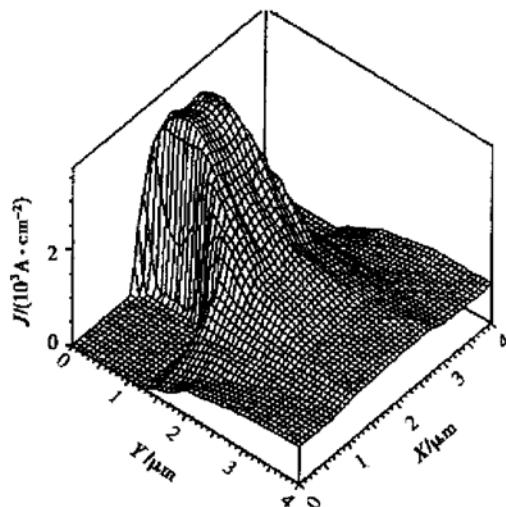


图 3 4H-SiC MPS 加 2V 正向偏压时体内的电流密度分布情况

Fig. 3 Current density distribution of 4H-SiC MPS applied 2V forward bias

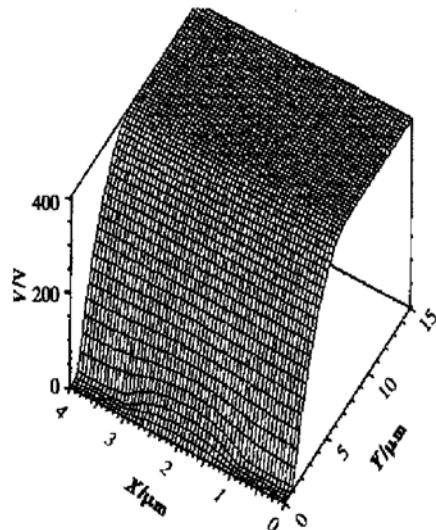


图 4 4H-SiC MPS 加 400V 反向偏压时体内的电位分布情况

Fig. 4 Potential distribution of 4H-SiC MPS applied 400V reverse bias

3.2 伏安特性

以下 4H-SiC MPS 伏安特性的模拟采用的结构和材料参数为 PN 结和肖特基区总宽度为 $4\mu\text{m}$, 外

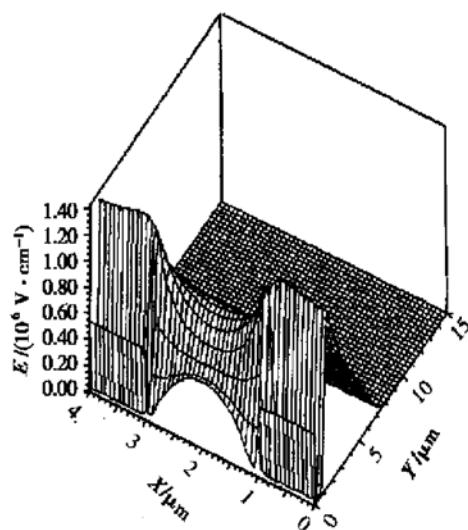


图 5 4H-SiC MPS 加 400V 反向偏压时体内的电场分布情况

Fig. 5 Electric field distribution of 4H-SiC MPS applied 400V reverse bias

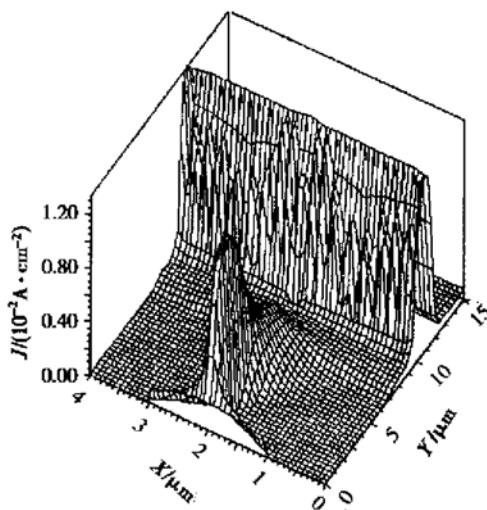


图 6 4H-SiC MPS 加 400V 反向偏压时体内的电流密度分布情况

Fig. 6 Current density distribution of 4H-SiC MPS applied 400V reverse bias

延层厚度为 $10\mu\text{m}$, 掺杂浓度为 $1.4 \times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$, p^+ 区掺杂浓度为 10^{18} cm^{-3} , 结深为 $1\mu\text{m}$, 衬底厚度为 $380\mu\text{m}$, 掺杂浓度为 10^{18} cm^{-3} , 肖特基金属为 Ni. 与之比较的 PN 结二极管和 Schottky 二极管除 PN 结和肖特基区的宽度外, 其它参数与 MPS 相同.

硅 MPS 的 PN 结和肖特基区总宽度为 $4\mu\text{m}$, 外延层厚度为 $40\mu\text{m}$, 掺杂浓度为 10^{15} cm^{-3} , p^+ 区掺杂浓度为 10^{17} cm^{-3} , 结深为 $1\mu\text{m}$, 衬底厚度为 $380\mu\text{m}$,

肖特基金属为 Ni.

如图 7 所示, 在肖特基区面积足够大时, 4H-SiC MPS 的正向开启电压与肖特基相比相差无几, 但比 PN 结要小得多. 这是因为 MPS 结构在正向偏压下, 起主要作用的是肖特基, 它决定了开启电压, 而且对于 4H-SiC 来说, 克服肖特基势垒所需要的电压比克服 PN 结的自建势所需要的电压要小得多. 从图 7 中还可以看出, 随着肖特基区宽度所占单元总宽度的比例的增加, MPS 的正向电流密度逐渐增大, 当肖特基区的宽度所占比例大到一定程度, MPS 的性质就很接近于肖特基二极管, 当肖特基区的宽度所占比例小到一定程度时, MPS 的性质就很接近于 PN 结.

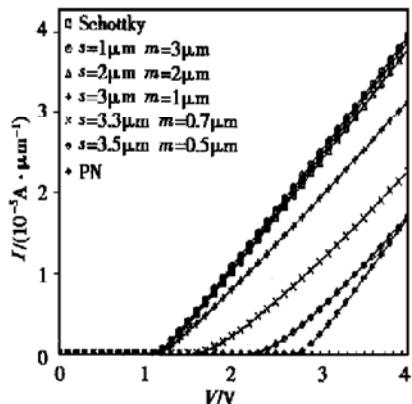


图 7 肖特基区宽度的变化对 4H-SiC MPS 正向特性的影响以及与 PN 结和肖特基二极管的比较 其中 m 为肖特基区宽度, s 为 PN 结区宽度.

Fig. 7 Forward I - V characteristics of 4H-SiC MPS with different percentage of Schottky area

如图 8 所示, 4H-SiC MPS 的击穿电压与 PN 结接近, 但比肖特基二极管的击穿电压要大得多, 这是因为 MPS 结构在反向偏压下, 起主要作用的是 PN 结, 它决定了击穿电压, 而且 PN 结的击穿特性比肖特基二极管要好得多. 从图中还可以看出, 随着肖特基区宽度的减小, MPS 的击穿特性向 PN 结靠拢, 当肖特基区的宽度小到一定程度, MPS 的击穿电压就接近于 PN 结, 当肖特基区的宽度增大时, MPS 的击穿特性向肖特基二极管靠拢.

图 9 是硅 MPS 在 300K 时的击穿特性, 对于三种不同的结构, 击穿电压均小于 300V, 显然 4H-SiC MPS 的反向特性远优于硅 MPS.

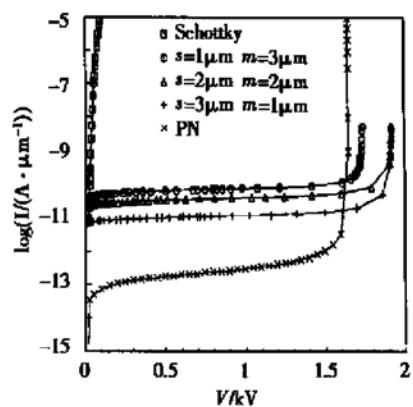


图 8 温度为 700K 时, 肖特基区宽度的变化对 4H-SiC MPS 反向特性的影响以及与 PN 结和肖特基二极管的比较 其中 m 为肖特基区宽度, s 为 PN 结区宽度.

Fig. 8 Reverse I - V characteristics of 4H-SiC MPS with different percentage of Schottky area width when the temperature being 700K

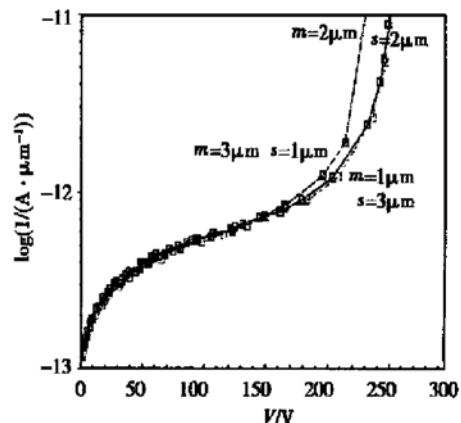


图 9 温度为 300K 时, 不同肖特基区宽度及 PN 结宽度情况下硅 MPS 的反向特性 其中 m 为肖特基区宽度, s 为 PN 结区宽度.

Fig. 9 Reverse I - V characteristics of Si MPS with different percentage of Schottky area width when the temperature being 300K

综上所述, MPS 结构综合了 PN 结结构和肖特基结构的优点, 具有很好的正向和反向特性; 4H-SiC MPS 的反向特性优于硅 MPS; 还可以通过调整肖特基和 PN 结的面积比来调整其性能. 例如, 当重点要求好的正向特性时, 可以通过增加肖特基的面积比来实现, 而当更注重反向特性时, 可以通过增加 PN 结的面积比来实现. 所以说, 4H-SiC MPS 是很有前途的功率整流器.

4 结论

本文利用模拟软件 MEDICI 对碳化硅混合 PiN/Schottky 二极管(MPS)的体特性及伏安特性进行了模拟。结果表明, MPS 的工作原理是正向肖特基起主要作用, 而反向时 PN 结使漏电流大大减小。MPS 正向压降小, 电流密度大(对于本文采用的样品, 在 2V 正向偏压下达到 $10^{-5}\text{A}/\mu\text{m}$), 反向漏电流小, 击穿电压高(2000V 左右), 并且可以通过增加肖特基的面积比来提高其正向特性, 又可以通过增加 PN 结的面积比来提高其反向特性, 与硅 MPS、碳化硅 PN 结以及碳化硅肖特基二极管相比具有明显的优势, 是理想的功率整流器。

参考文献

- [1] Zhang Yuming, Zhang Yimen, Alexandrov P, et al. Fabrication 4H-SiC merged PN-Schottky (MPS) diodes. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(3): 265
- [2] MEDICI Users Manual. Avant! Corporation, Fremont CA, 1998
- [3] Hao Yue, Peng Jun, Yang Yintang. Silicon carbide wide band gap semiconductor technology. Beijing: Science Press, 2000
- [4] Zhang Yuming, Niu Xinjun, Zhang Yimen. Design and modeling of merged PiN/Schottky diodes (MPS) based on SiC and Si. Accepted by Power Electronics[张玉明, 牛新军, 张义门. SiC 和 Si 混合 PiN/Schottky 二极管(MPS) 的模拟和设计. 电力电子技术, 已录用]
- [5] Zhang Yuming. Study of silicon carbide material and devices. PhD thesis, Xi'an Jiaotong University, 1998[张玉明. 碳化硅材料与器件的研究. 博士学位论文, 西安交通大学, 1998]
- [6] Baliga B J. Analysis of junction barrier controlled Schottky rectifier characteristics. Solid-State Electronics, 1985, 28(11): 1089
- [7] Baliga B J. Analysis of a high voltage merged pin/Schottky (MPS) rectifier. IEEE Electron Device Lett, 1987, EDL-8(9): 407
- [8] Tu S L, Baliga B J. Controlling the characteristics of the MPS rectifier by variation of area of Schottky region. IEEE Trans Electron Devices, 1993, ED-40(7): 1307
- [9] Baliga B J. Modern Power Devices. New York: Wiley, 1987
- [10] Bahatnagar M, Baliga B J. Comparison of 6H-SiC, 3C-SiC, and Si for power devices. IEEE Trans Electron Devices, 1993, ED-40(3): 645
- [11] Konstantinov A O, Wahab Q, Nordell N, et al. Ionization rates and critical electric field in 4H Silicon carbide. Appl Phys Lett, 1997, 71(1): 90

Two-Dimensional Simulation of SiC Merged PiN/Schottky Diodes

Niu Xinjun, Zhang Yuming, Zhang Yimen and Lü Hongliang

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

Abstract: Transport mechanics and $I-V$ characteristics of SiC merged PiN/Schottky diodes (MPS) are simulated using MEDICI. It indicates that Schottky diode plays a important role when MPS is forward biased, and while MPS is reverse biased, the PN junction reduces the leakage current extremely. MPS has low forward voltage drop, high current density ($10^{-5}\text{A}/\mu\text{m}$ at a forward bias of 2V), high breakdown voltage (about 2000V), and low reverse leakage current. The performance of MPS can be adjusted by varing the area percentage of Schottky and PN junction. Compared with silicon MPS, SiC PN junction, and SiC Schottky diode, SiC MPS has a lot of advantage. SiC MPS is a kind of promising rectifier.

Key words: silicon carbide; MPS; two-dimensional simulation; MEDICI; transport mechanics; $I-V$ characteristics

EEACC: 2560H; 2560B; 2520M

Article ID: 0253-4177(2002)05-0517-06

Niu Xinjun male, was born in 1977. He is engaged in the research on SiC merged PiN/Schottky diodes.

Zhang Yuming male, was born in 1965, professor. He is engaged in the research on physics, technology, model and simulation of SiC.

Received 31 July 2001, revised manuscript received 9 November 2001

© 2002 The Chinese Institute of Electronics