

6H-SiC Schottky 二极管的正向特性

尚也淳 刘忠立 王姝睿

(中国科学院半导体研究所 微电子研究发展中心, 北京 100083)

摘要: 提出了一种考虑 Schottky 结势垒不均匀性和界面层作用的 SiC Schottky 二极管(SBD) 正向特性模型, 势垒的不均匀性来自于 SiC 外延层上的各种缺陷, 而界面层上的压降会使正向 Schottky 结的有效势垒增高. 该模型能够对不同温度下 SiC Schottky 结正向特性很好地进行模拟, 模拟结果和测量数据相符. 它更适用于考虑器件温度变化的场合, 从机理上说明了理想因子、有效势垒和温度的关系.

关键词: SiC; Schottky 结; 势垒不均匀性; 界面层

PACC: 7360P; 7330; 7340N

中图分类号: TN311+.8

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2003)05-0504-06

1 引言

SiC 具有很高的击穿电场, 因此用 SiC 可制作高压 Schottky 二极管(SBD). 在高频功率电路中, SBD 是理想的整流器. SiC 优越的材料性质使得 SiC Schottky 整流器能够应用于常规整流器不能工作的高温环境中, 且它的漏电流小, 正向压降低. Schottky 接触是制作 SiC MESFET 和 SiC 整流器的关键. 当前对 SiC Schottky 结势垒高度与金属功函数、SiC 掺杂、SiC 晶向等之间的关系都曾进行过研究, 得到了一些有意义的结果. 在我们的测量及一些文献的研究中发现^[1], SiC Schottky 势垒高度和理想因子是随温度发生变化的, 为了更好地研制出高性能的 SiC Schottky 高温高频器件, 必须对这种现象有一个理论的认识. 对于 SiC Schottky 结特性的理论研究目前可归结为两种观点: 一是认为 SiC Schottky 势垒是不均匀的, 即在正常的势垒分布中存在不连续的低于正常势垒的小区域, Bhatnagar^[1]通过对 SiC Schottky 接触的 EBIC 分析认为, SiC 外延层中的缺陷造成了这种势垒的变化. 对于 Schottky 势垒不均匀性对 SBD 特性所带来的影响曾有过一些研究, 采用的是一种简单的区域模型^[1], 未考虑

不同势垒区之间的相互作用及相互耦合. 这种只是采用两种孤立的 Schottky 势垒的模型会给分析结果带来误差. 另一种观点是 Lvanov 等人^[2,3]认为在 SiC 衬底和金属层之间存在一个界面层, 用这种界面层模型可以很好地对 SiC Schottky 结的反向特性及其势垒高度的测量结果进行解释.

为了更好地研究 SiC Schottky 结的特性与势垒变化的关系, 本文采用正态分布对 SiC Schottky 势垒的不连续性进行描述, 并考虑界面层对 Schottky 势垒的影响, 建立了在势垒不均匀情况下 SiC Schottky 二极管的正向特性模型, 并对 Ti/6H-SiC Schottky 结的电特性进行了测量. 结果发现本文提出的模型很好地解释了测量到的势垒高度和理想因子随温度的变化.

2 SiC Schottky 结的理论分析

2.1 非平衡条件下 SiC Schottky 势垒的变化

依据界面层模型^[4], SBD 金属层和 SiC 之间的界面层为原子量级, 它对电子是透明的. 当在 Schottky 结上存在一偏压时, 就会在这个界面层上产生一定的压降 V_i . 图 1 是在金属/n 型 SiC Schottky 结

尚也淳 男, 从事 SiC 器件及 MRAM 的研究.

刘忠立 男, 研究员, 博士生导师, 从事半导体器件及其物理研究.

2002-07-03 收到, 2002-10-30 定稿

上加一正向电压 V_b 时的能带图. 在图中, W_m 为金属功函数, χ 为 SiC 的亲能, Λ 为平衡时界面层两边的压降, $q\Delta\phi_{bi}$ 为镜像力引起的势垒降低, 界面层宽度为 λ . 由图可知 V_b 由两部分组成:

$$V_b = V_i + V_{semi} \quad (1)$$

式中 V_{semi} 为在 SiC Schottky 结耗尽区上的电压降.

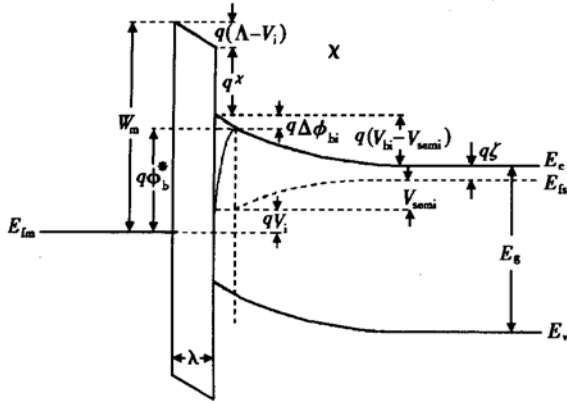


图 1 正偏时的 SiC Schottky 结能带图

Fig. 1 Energy-band diagram of SiC Schottky contact in forward bias

在正偏条件下, 由于 Schottky 结界面层上的压降使得 Schottky 结的势垒高度增大, 考虑到镜像力的作用, 从金属到半导体电子实际越过的势垒为:

$$q\phi_b^* = q(\phi_b - \Delta\phi_{bi} + V_i) \quad (2)$$

其中 ϕ_b 为 SiC Schottky 正偏压时的势垒高度. 忽略 SiC Schottky 结上的固定电荷和界面态陷阱的作用, 那么:

$$V_i = \frac{\lambda}{\epsilon_i \epsilon_0} (Q_{sc0} - Q_{scf}) \quad (3)$$

式中 ϵ_i 为界面层的介电常数; Q_{sc0} 为平衡状态下 SiC Schottky 结耗尽层的总电荷; Q_{scf} 为有正偏压时 SiC Schottky 结耗尽层中的总电荷.

2.2 Schottky 势垒不均匀性的分析

SiC/金属接触的 Schottky 势垒是在其界面附近的各种电荷库仑势共同作用的结果, 一般来说, 这些电荷包括不可动离子和处于缺陷陷阱中的电子, 而这些不可动离子和陷阱区域是随机地分布在 SiC 界面上的, 这会造成 SiC 的表面势在一定的区域内发生变化, 从而引起 SiC Schottky 势垒的变化. 从统计角度来看, 这种势垒的变化服从一定的分布^[5-7]. 和以前的许多研究一样, 我们认为 SiC Schottky 结

势垒的变化可用正态分布来表示^[11]:

$$P(\phi_b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_s} \exp\left[-\frac{(\phi_b - \bar{\phi}_b)^2}{2\delta_s^2}\right] \quad (4)$$

其中 $\bar{\phi}_b$ 是 Schottky 结势垒的均值; δ_s 为均方差. 根据热电子发射理论, 在 SiC/金属界面某一点上 Schottky 势垒为 ϕ_b 时, 考虑到界面层和镜像力的影响, 那么其电流密度为:

$$J' = A^* T^2 \exp\left[-\frac{q\phi_b^*}{k_B T}\right] \left[\exp\left[\frac{qV_b}{k_B T}\right] - 1\right] \quad (5)$$

式中 A^* 为 Richardson 常数. 对于整个 Schottky 接触来说, 总的电流密度 J 应是对 J' 的积分.

$$\begin{aligned} J &= \int J' P(\phi_b) d\phi_b \\ &= A^* T^2 \exp\left[-\frac{q\phi_b^{eff}}{k_B T}\right] \left[\exp\left[\frac{qV_b}{k_B T}\right] - 1\right] \\ &= A^* T^2 \exp\left[-\frac{q\phi_{b0}^{eff}}{k_B T}\right] \left[\exp\left[\frac{qV_b}{nk_B T}\right] - 1\right] \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $q\phi_b^{eff}$ 为有效势垒高度; $q\phi_{b0}^{eff}$ 为 Schottky 结零偏压时的有效势垒; n 为理想因子. ϕ_b^{eff} 可用下式表示:

$$\phi_b^{eff} = \bar{\phi}_b - \frac{q\delta_s^2}{2k_B T} - \Delta\phi_{bi} + V_i \quad (7)$$

由(6)式可得:

$$\begin{aligned} \frac{1}{n} - 1 &= -\frac{d\phi_b^{eff}}{dV_b} = -\frac{d\bar{\phi}_b}{dV_b} + \frac{q}{2k_B T} \times \frac{d\delta_s^2}{dV_b} \\ &\quad + q \frac{d\Delta\phi_{bi}}{dV_b} - q \frac{dV_i}{dV_b} \end{aligned} \quad (8)$$

在以下的分析中认定 $\bar{\phi}_b$ 和 δ_s^2 都与 Schottky 结上的电压 V_b 呈线性关系^[5,7], 且有:

$$\begin{aligned} \bar{\phi}_b &= \bar{\phi}_{b0} + \beta V_b \\ \delta_s^2 &= \delta_{s0}^2 + \gamma V_b \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $\bar{\phi}_{b0}$ 和 δ_{s0} 分别为零偏压时 Schottky 势垒的均值和均方差, 依据文献[3]对于 Ti/n 型 6H-SiC Schottky 结, δ_{s0}^2 可表示为 $\delta_{s0}^2 = \delta_{s0}^2|_{T=0} + \alpha_0 T$. β 、 γ 、 $\delta_{s0}|_{T=0}$ 和 α_0 都为常数.

随着 Schottky 结所加偏压的增大, 开态电阻 R_{on} 是影响 Schottky 结正向特性的主要因素, 考虑到外延层和衬底层中电流流过时会发生散开, 由此开态电阻可表示为^[8]:

$$\begin{aligned} R_{on} &= \frac{r\rho_{epi}(T)}{2} \arctan\left[\frac{2t_{epi}}{r}\right] \\ &\quad + \frac{r\rho_{sub}(T)}{2} \arctan\left[\frac{2t_{sub}}{r}\right] + R_c \end{aligned} \quad (10)$$

其中 R_c 是衬底的接触电阻; r 为 SiC Schottky 圆形接触半径; t_{epi} 和 t_{sub} 为外延层和衬底的厚度; $\rho_{\text{epi}}(T)$ 和 $\rho_{\text{sub}}(T)$ 为外延层和衬底的电阻率. 在确定 $\rho_{\text{epi}}(T)$ 和 $\rho_{\text{sub}}(T)$ 的过程中, 电子浓度的获得是依据 n 型 6H-SiC 中有两个杂质能级的准中性条件^[9], 迁移率则根据 Caughey-Thomas 方程得到, 在 Caughey-Thomas 方程中, $\mu(T) \propto (300/T)^{4.5[8]}$.

考虑到 R_{on} 的影响, 则在所加电压为 V_f 时, SiC Schottky 结的正向特性可表述如下:

$$J = A^* T^2 \exp\left[-\frac{q\phi_{\text{b}}^f}{k_B T}\right] \left[\exp\left[\frac{q(V_f - R_{\text{on}} J \pi r^2)}{k_B T}\right] - 1 \right] \quad (11)$$

3 实验测量及参数提取

通过 MBE 在掺杂浓度为 $1.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 n 型 6H-SiC 衬底上制作 SiC 外延层, 晶向为 (100) Si 面偏轴 3.5° , 外延层的掺杂浓度为 $5.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. 在 SiC 外延层上热蒸发 Ti 以形成 Schottky 接触, 并光刻出图形. 衬底背面的欧姆接触是通过蒸 Al 来形成的. 用 Keithley 2400 在不同的温度下对所制成的 SiC Schottky 结正向特性进行测量, 结果发现, 随着 Schottky 结图形面积/周长比的增加, 正向电流密度呈微弱下降趋势, 这是由于 Schottky 结的边缘效应造成的. 随着面积/周长比的增大, 结边缘漏电对 Schottky 结造成的总体影响会越来越小. 考虑到所研究 Schottky 结的边缘效应不明显, 为了使问题简化, 在以下的分析中, 将不涉及 SiC Schottky 结的边缘漏电.

当 Schottky 结所加的正向电压较高时, Schottky 结的正向电流会随所加电压呈线性变化, 这时决定 Schottky 结正向电流的主要因素是开态电阻 R_{on} , 因此根据此时的 Schottky 结正向 $I-V$ 特性可以提取出 R_{on} . 根据所提取的 R_{on} , 利用测量到的电流可以得到随着整个 Schottky 结所加正向电压 V_b 的增加 R_{on} 上所承受的压降的变化. 由加在 Schottky 结上的总电压 V_f 中减去 R_{on} 上所承受的压降可以得到真正 Schottky 结上的偏压 V_b 和正向电流呈指数关系, 从这一指数型关系中可以提取出不同温度下的理想因子和零偏压时 Schottky 结上的势垒高度.

4 模拟结果及讨论

图 2 是 Ti/6H-SiC Schottky 结正向特性模拟

结果和测量数据的比较, 在模拟中考虑了 Schottky 结势垒不均匀性和界面层对势垒的影响. 图中 SiC Schottky 二极管的正向电流主要由热电子发射机制支配, 开启电压在 0.5V 左右, 而当整个 Schottky 二极管所加电压超过开启电压时, R_{on} 对 Schottky 结的作用变大, 电流和所加电压呈线性关系. 由图 2 可以看出, 当电压大于开启电压后, 随着温度的增加, 电流密度随着电压增长的幅度变慢, 这表明, R_{on} 随着温度的增大而增大, 虽然在较高温度下 SiC 中的载流子浓度会有所增加, 但载流子迁移率却降得更快, 从而导致了 R_{on} 的增加. 而在电压低于 0.5V 时, 在 $I-V$ 呈指数关系的区域, 随着温度的升高, 电流增大, 这一方面是由温度所引起有效势垒降低造成的, 另一方面是由于在高温下, 电子具有更高的能量造成的. 在本文的模拟中, $\phi_{\text{b}0} = 1.0\text{V}$, $\delta_{\text{so}}|_{T=0} = 100\text{mV}$, $\alpha_0 = 19\text{mV}^2/\text{K}^{[3]}$. Ti/6H-SiC Schottky 结 R 和 γ 的值当前还没有报道过. 因此根据对理想因子 n 测量值的拟合取 $\beta = -0.24$, $\gamma = -0.018\text{V}$. 基于对 R_{on} 不同温度下测量数据的分析, 在本文中取 $R_c = 30\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$.

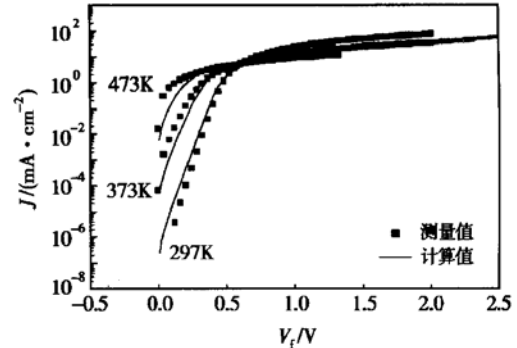


图 2 Ti/6H-SiC Schottky 结的正向特性

Fig. 2 Forward $I-V$ characteristics of Ti/6H-SiC Schottky barrier diode

在图 3 中 n^{-1} 和 T^{-1} 基本呈线性递减且有 $n > 1$, Schottky 结正向特性理想因子大于 1 这种现象在很多 Si 及 SiC Schottky 结的测量中都有发现. 理想因子大于 1 是基于以下两方面的原因, 一是随着偏压的增大, SiC Schottky 结势垒高度的分布会趋向于一个更窄的范围, 即 δ_s^2 减小. 在 (7) 式中, δ_s^2 的减小会补偿 ϕ_{b}^f 随 V_b 的增大而引起的降低, 使得 ϕ_{b}^f 增大^[9]. 另外由于 $\frac{dV_i}{dV_b} > 0$, 而 $\frac{d\Delta\phi_{\text{b}}}{dV_b} < 0$, 这都会导致 ϕ_{b}^f 同 V_b 呈递增关系, 引起 $n > 1$. 在图 3 中 200°C 时 n

的测量值没有给出, 这是因为在 200°C 时由于测量系统误差较大, 所测得的 n 值不统一.

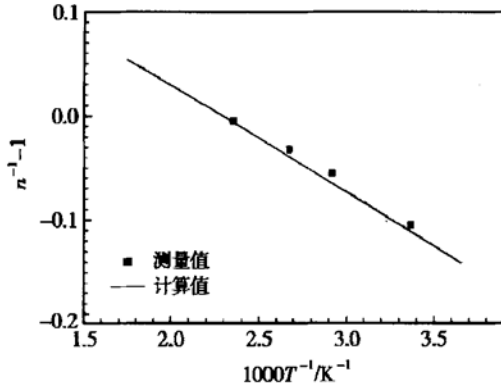


图 3 6H-SiC Schottky 结理想因子与温度的关系

Fig. 3 Temperature-dependent ideality factor of 6H-SiC Schottky contact

图 4 是从 Schottky 结的 $I-V$ 关系得到的有效结势垒高度和温度的关系. 有研究认为由 Schottky 结 $C-V$ 关系得到的结势垒 Φ_b^v 代表着势垒的一个平均^[3,7], 即本文中的 Φ_0 , 它不随温度而发生变化, 且有关系 $\Phi_b^v - \Phi_0 = \frac{q\delta_s^2(T)}{2k_B T}$ 存在 (Φ_b^v 是由 Schottky 结 $I-V$ 关系得到的结势垒). 如果不考虑 SiC Schottky 结界面层的作用, 这与 (7) 式基本一致. 对于 $\delta_s^2(T)$ 与温度的具体关系目前虽然因各人的测量结果不同而异, 但可以肯定的是由于温度对 SiC Schottky 结势垒不均匀性的影响, 从而使得 Φ_b^v 随着温度发生改变.

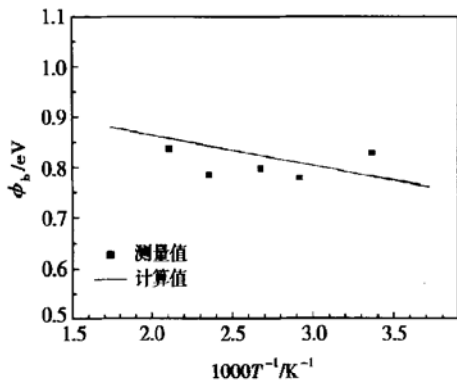


图 4 Schottky 结势垒高度和温度的关系

Fig. 4 Variation of barrier height as a function of inverse of temperature for SiC Schottky contact

图 5 反映了 SiC Schottky 结不同厚度界面层对 Schottky 结有效势垒高度的影响. 根据文献, 界面

层厚度可取 0.3~ 3nm^[2,3]. 由图可知, 当 Schottky 界面层较厚时, 界面层对 Schottky 结特性的影响会增大. 这是由于 Schottky 结的正向电特性是由半导体导带中电子的能量决定的, 即是由半导体上实际所加的正向电压 V_{semi} 来决定, 当 Schottky 界面层厚度加大时, 要在半导体耗尽层上产生相同的 V_{semi} , Schottky 界面层上就必须有更大的电压降, 这样才能保证 Schottky 界面层两边电荷的平衡. 为了说明 Schottky 界面层对 Schottky 结势垒高度影响的程度, 在图 5 中也给出了不考虑镜像力作用时的势垒变化情况. 可见随着界面层厚度的增大且 Schottky 结电压较大时, 界面层压降对 Schottky 结特性的影响会超过镜像力的作用而变得越来越大.

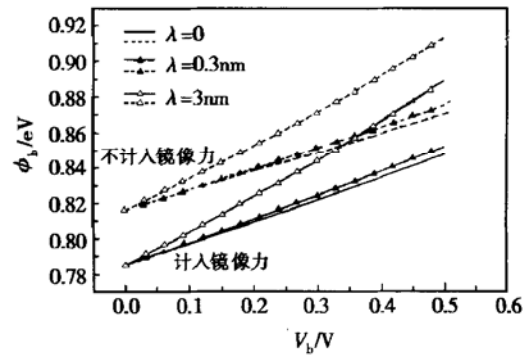


图 5 Schottky 有效势垒随结电压的变化

Fig. 5 Effective barrier height as a function of the forward bias across Schottky contact

Schottky 结势垒的波动会引起有效势垒的改变. 图 6 是在不同温度下 SiC SBD 的正向电流因势垒的不均匀性而发生的变化. Schottky 结势垒不均匀会引起 Schottky 结正向总电流的增大, 这就意味

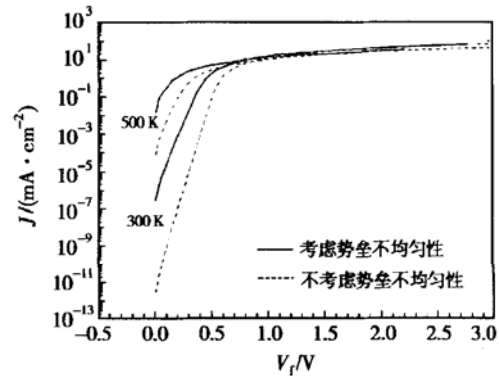


图 6 Schottky 结势垒不均匀性对 SiC SBD 正向特性的影响

Fig. 6 Effect of barrier inhomogeneities on forward $I-V$ characteristics of SiC SBD

着有效势垒的降低. 通过对 SiC Schottky 结的 E-BIC 分析, Skromme^[10] 发现理想因子随着 EBIC 观测图像中暗斑的数量而呈线性增加, 据分析这些暗斑代表了 SiC 外延层上包括螺旋位错在内的各种缺陷. 这些缺陷有的起复合中心的作用, 有的充当电荷陷阱引起 Schottky 结界面势垒的变化. 而理想因子反映的是有效势垒高度随结电压的变化, 可见正是 SiC/金属界面上存在的缺陷引起了 SiC Schottky 结势垒的不均匀性, 从而对整个 Schottky 结的 $I-V$ 特性产生了影响.

5 小结

对不同温度下 6H-SiC/Ti Schottky 二极管正向特性的测量结果表明: 虽然热电子发射是控制其正向特性的主要机制, 但是有效势垒和理想因子随温度的变化使得对不同温度下的 Schottky 结正向特性不能用单一的传统模型来表述. 在 SiC 外延层上会存在位错和因材料生长原因而导致的缺陷, 这些缺陷能够引起 SiC Schottky 结局部势垒的改变. 另外 SiC Schottky 结界面层的压降会抬高正偏时 Schottky 结的势垒高度, 这些都会对整个 Schottky 结的正向电特性产生影响. 本文用正态分布对 Schottky 结势垒的变化进行了描述, 并在传统热电子发射模型的基础上提出了一种考虑结势垒不均匀性的 SiC Schottky 正向特性模型, 在这个模型中包括了 Schottky 界面层对 Schottky 结正向特性的影响. 这个模型能够很好地对所测量的 SiC Schottky 结电特性进行模拟, 并从机理上对 $n > 1$ 这种现象及 n 、有效势垒与温度之间的关系进行了解释, 认为正是由于 Schottky 结势垒不均匀性和 Schottky 界面层的存在才导致理想因子和有效势垒高度的变化. 对 Schottky 结正向特性的研究表明, 结势垒的波动会引起有效势垒高度降低从而使得 Schottky 结正

向热电子发射电流增大, 而当 Schottky 结具有较厚的界面层时, 界面层对 Schottky 结势垒的影响会变得显著.

参考文献

- [1] Bhatnagar M, Baliga G J, Kirk H R. Effect of surface inhomogeneities on the electrical characteristics of SiC Schottky contacts. *IEEE Trans Electron Devices*, 1996, 43(1): 150
- [2] Ivanov P A, Ignatev K I. Schottky barrier height in metal-SiC contact — new approach to modeling, silicon carbide, III-nitrides and related materials. *Materials Science Forum*, 1998, 264~ 268: 813
- [3] Schröder C, Heiland W, Heiland R. Analysis of reverse current-voltage characteristics of Ti/6H-SiC Schottky diodes. *Appl Phys Lett*, 1996, 66(14): 1957
- [4] Wu C Y. Interfacial layer theory of the Schottky barrier diodes. *J Appl Phys*, 1980, 51(7): 3786
- [5] Bandyopadhyay S, Bhattacharyya A, Sen S K. Measurements and modeling of the barrier heights and ideality factors in the metal/conducting polymer composite Schottky device. *J Appl Phys*, 1999, 85(7): 3671
- [6] Zheng L, Joshi R P. Effects of barrier height fluctuations and electron tunneling on the reverse characteristics of 6H-SiC Schottky contacts. *J Appl Phys*, 1999, 85(7): 3701
- [7] Werner J H, Güttler H H. Barrier inhomogeneities at Schottky contacts. *J Appl Phys*, 1991, 69(3): 1522
- [8] Zhang Q, Madangarli V, Tarplee M. Comparison of current-voltage characteristics of n- and p-type 6H-SiC Schottky diodes. *J Electron Mater*, 2001, 30(3): 196
- [9] Shang Yechun, Zhang Yimen, Zhang Yuming. Analysis of electrical characteristics in 6H-SiC junctions irradiated by neutron. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2000, 21(7): 691 (in Chinese) [尚也淳, 张义门, 张玉明. 中子辐照下的 6H-SiC pn 结电特性分析. *半导体学报*, 2000, 21(7): 691]
- [10] Skromme B J, Luckowski E, Moore K. Electrical characteristics of Schottky barrier on 4H-SiC: The effect of barrier height nonuniformity. *J Electron Mater*, 2000, 29(3): 376

Forward Characteristics of 6H-SiC Schottky Contacts

Shang Yechun, Liu Zhongli and Wang Shurui

(*Microelectronics R&D Center, Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

Abstract: An analytical model for forward characteristics of SiC Schottky contacts is developed taking into account the barrier inhomogeneities and interfacial layer theory. It is suggested that electrons trapped in epitaxial layer defects at the SiC/metal interface can give rise to fluctuations in the surface potential and result in lowering of the barrier height in the localized region, and thus affect the electrical I - V characteristics of the Schottky contacts. The voltage drop across the interfacial layer will raise the effective barrier height in the forward bias. The proposed model can explain the forward characteristics observed in 6H-SiC/Ti Schottky contacts from 297K to 473K. The results of experiments show good agreement with the model. The model is more suitable for SiC Schottky diode working in a wide temperature range. The increase in barrier height and decrease of ideality factor with increase of temperature are interpreted theoretically assuming a Gaussian distribution of the barrier heights.

Key words: SiC; schottky contacts; barrier height inhomogeneities; interfacial layer

PACC: 7360P; 7330; 7340N

Article ID: 0253-4177(2003)05-0504-06

Shang Yechun male, PhD candidate. His present interests are in the study of special IC devices working in harsh condition, including SiC devices and MRAM.

Liu Zhongli male, professor, advisor of PhD candidates. He is engaged in the research on semiconductor device characterization and processing.

Received 3 July 2002, revised manuscript received 30 October 2002

©2003 The Chinese Institute of Electronics