

Cu/, Ni/4H-SiC Schottky 势垒的退火研究

杨伟锋¹ 杨克勤¹ 陈厦平¹ 张 峰¹ 王良均¹ 吴正云^{1,2}

(1 厦门大学物理系, 厦门 361005)

(2 厦门大学萨本栋微机电中心, 厦门 361005)

摘要: 采用磁控溅射方法分别在 n 型 4H-SiC 上沉积 Cu, Ni 金属薄膜形成 Schottky 接触, 并进行不同温度下的退火, 通过 $I-V$ 和 $C-V$ 测试, 研究不同退火温度对 Schottky 势垒高度以及理想因子的影响. 研究表明, 对 Cu, Ni 金属, 适当的退火温度能提高其与 4H-SiC 所形成的 Schottky 势垒高度, 改善理想因子, 但若退火温度过高, 则会导致接触的整流特性退化. 器件在退火前后, 反向漏电流都较小. 热电子发射是其主要的输运机理. 所制备的金属半导体接触界面比较理想, 无强烈费米能级钉扎.

关键词: 4H-SiC; Schottky 势垒高度; 退火

PACC: 7340N; 7340V EEACC: 2530D; 2520M; 2550A

中图分类号: O472+.4 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2005)S0-0277-04

1 引言

第三代宽禁带半导体 SiC 因其具有禁带宽度大、击穿电场强度高、饱和电子漂移速度大、热导率高及抗辐照性能强等一系列优点, 特别适合制作高压、高温、高频、高功率、耐辐照等半导体器件^[1~3]. 这些器件可广泛应用于国防、宇航、能源、电力、交通、通信等领域. 在 SiC 多型的结构(4H-SiC, 6H-SiC, 3C-SiC)中, 4H-SiC 具有更宽的带隙以及更高的电子迁移率, 随着高质量单晶材料制备技术上的突破, 它被认为是大功率器件方面最有前途的 SiC 材料^[4]. 而基于 Schottky 接触的 SiC 电子器件一直备受人们关注, 因为其器件性能主要依赖于 Schottky 势垒高度(SBH), 因此, 金属/SiC Schottky 接触的研究更具应用意义.

本文采用标准的 RCA 清洗程序, 在 n 型 4H-SiC 样品上通过光刻、磁控溅射、剥离等制备工艺制备了圆形图案的 Cu/, Ni/4H-SiC Schottky 接触, 通过 $I-V$ 和 $C-V$ 测试, 由拟合结果得到 Cu, Ni 金属与 4H-SiC Schottky 势垒高度和理想因子. 系统地研究了 Cu, Ni 金属与 4H-SiC Schottky 势垒性质的在不同退火温度下的变化, 并对实验结果给予解释.

2 实验

实验样品结构是在 n 型掺杂浓度为 10^{20} cm^{-3} 的 4H-SiC 衬底上外延一层厚度约为 $4 \mu\text{m}$, 掺杂浓度小于 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的 n 型层. 样品在制备前, 经过标准的 RCA 清洗程序后, 置入氧化炉通湿氧气氧化 1h 得到厚度约为 20nm 的 SiO_x 牺牲层, 然后用 50% HF 腐蚀溶液去掉此牺牲层, 得到一个新鲜的 SiC 面. 用氮气吹干后, 马上再置入氧化炉, 再经过 4h 的湿氧气氧化得到厚度约为 50nm 的 SiO_x 层.

为了在样品背面形成欧姆接触, 本文采用磁控溅射的方法在样品背面沉积厚度约为 500nm 的 Ni 后, 在氮气氛围下高温(1050°C)退火 30min. 为了在样品正面形成 Schottky 接触, 先利用光刻、显影技术在样品正面形成直径为 50, 100, 150, 200, 250 μm 的圆形图案, 用缓冲 HF 溶液去掉样片表面未被光刻胶保护的 SiO_x 层后, 立刻将样品置入磁控溅射炉中在样品正表面上分别沉积厚度为 150nm Cu, Ni 金属, 运用剥离工艺, 在样品表面形成 Schottky 接触. 之后, 再经相同的工艺, 制备接触焊盘. 本文对各个样品进行不同温度下的退火, 通过测试样品的 $I-V$ 和 $C-V$ 特性, 得到 SBH 及理想因子.

Cu, Ni 金属在不同温度下的退火条件见表 1.

表 1 实验样品退火条件

Table 1 Experimental samples and annealing conditions

Sample code	Metal	Annealing temperature/ $^{\circ}\text{C}$, atmosphere	Annealing time/min
1-1 #	Cu	300, N_2	18
1-2 #	Cu	400, N_2	12
1-3 #	Cu	500, N_2	12
1-4 #	Cu	700, N_2	5
2-1 #	Ni	300, N_2	18
2-2 #	Ni	400, N_2	12
2-3 #	Ni	500, N_2	12

3 结果与分析

3.1 I - V 特性

图 1 给出了退火前 Cu/, Ni/4H-SiC Schottky 整流接触的正向电流电压特性曲线, 其 I - V 特性遵循热离子发射理论. 根据金属与半导体 Schottky 接触热离子发射理论, 势垒高度 ϕ_B 以及理想因子 η 可分别由下面两式得到^[5]:

$$\phi_B = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{A^* T^2}{J_s} \right]$$

$$\eta = \frac{q}{kT} \left[\frac{\partial V}{\partial (\ln J)} \right] \quad (1)$$

式中 J_s 是饱和电流密度; η 是理想因子; A^* 是有效 Richardson 常数 ($146 \text{ A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^2)$). 对所得的 I - V 特性曲线在低电流密度区 ($< 10^{-1} \text{ A}/\text{cm}^2$) 进行直线拟合, 由直线斜率可得出 Cu/, Ni/4H-SiC Schottky 接触的理想因子 η (分别为 1.23 和 1.46). 由纵轴截距可以得到各个 Schottky 接触的饱和电流密度 (J_s). 由于 Schottky effect ($q\Delta\phi$) 所引起的 Schottky 势垒高度的降低值很小, 在拟合 SBH 的过程中我们忽略了 $\Delta\phi$ 的影响. 拟合结果表明接触的尺寸大小对 Schottky 势垒以及理想因子的影响可以忽略不计. 所以, 图中未对样品的尺寸再进行说明. 由拟合得到退火前 Cu/, Ni/4H-SiC Schottky 接触的 SBH 分别为 1.50eV 和 1.33eV.

图 2 给出理想因子和 Schottky 势垒高度随退火温度的变化情况.

由图 2(a) 可以看出, 对于 Cu/4H-SiC Schottky 接触, 300 $^{\circ}\text{C}$ 退火对接触的 SBH 和理想因子影响并不是很大, 但当退火温度升高到 400, 500 $^{\circ}\text{C}$ 时, 势垒

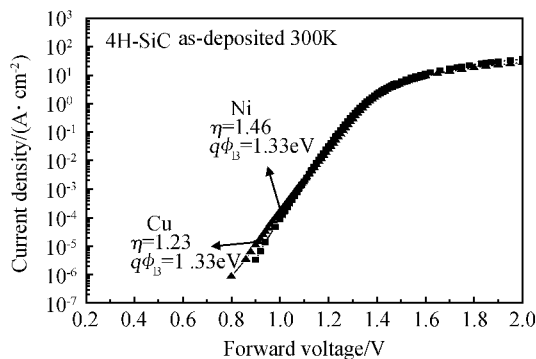


图 1 退火前 Cu/, Ni/4H-SiC Schottky 整流接触的 I - V 特性
Fig. 1 I - V characteristics for different metal/4H-SiC Schottky contacts in as-deposition condition

高度得到最大的提高, 而理想因子也随之增大. 当退火温度提高到 700 $^{\circ}\text{C}$, 则势垒高度变低, 理想因子变得更大. 这个结果和 Hatayama 等人^[6]报道的结果大致相符. 退火过程改变了 Cu/4H-SiC 界面的化学键结构. 超过 300 $^{\circ}\text{C}$ 的退火, 能在 Cu/4H-SiC 界面产生少量铜硅化合物, 有助于形成稳定的 Schottky 结, 减少表面态和提高势垒高度. 但是超过 500 $^{\circ}\text{C}$ 的退火导致在 Cu/4H-SiC 界面, Cu 与 4H-SiC 发生激烈的化学反应, 使得 Schottky 特性下降, 势垒高度降低, 理想因子变大.

由图 2(b) 可以看出, 在没退火的情况下, Ni/4H-SiC 接触的 SBH 很低, 理想因子也很大, 当退火温度升高到 400, 500 $^{\circ}\text{C}$, 其势垒高度及理想因子都得到了很大的改善. 这是因为, 在 N_2 气氛下退火, Ni/4H-SiC 界面上的表面态密度会减小, 减少了结构中的空位^[7]. 在高温退火 (高于 700 $^{\circ}\text{C}$) 时, Ni 与 4H-SiC 在界面反应生成镍硅化合物以及大量空隙, 则可能变为欧姆接触^[8].

退火前, 对样品进行 I - V 反向特性测试, 当反向偏压加到 100V 时, 反向暗电流小于 0.1nA. 在较高温度退火后 (对 Cu 金属, 400 $^{\circ}\text{C}$; 对 Ni 金属, 500 $^{\circ}\text{C}$), 在 100V 反向偏压下, Cu/, Ni/4H-SiC Schottky 接触暗电流均有所增大, 但均小于 1nA. 可知样品经高温退火, 其整流特性依然良好.

Ni 的金属功函数 (5.15eV) 大于 Cu 的 (4.65eV)^[9], 势垒高度大致依赖于金属功函数, 同时所得理想因子较小. 由 Schottky-mott 模型, SBH 由金属功函数决定, 说明样品的金属半导体界面比较理想, 未出现强的费米能级钉扎.

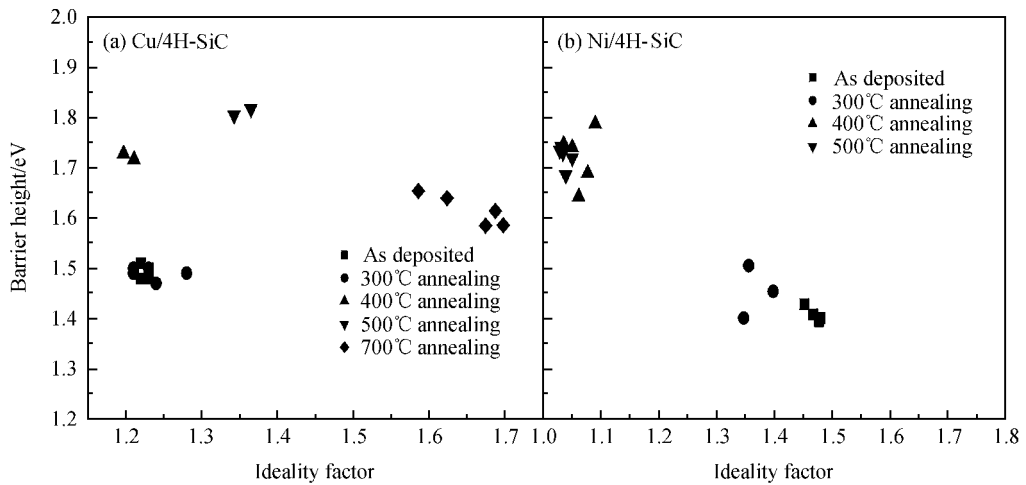


图2 金属/4H-SiC Schottky 接触在不同退火温度下,势垒高度随理想因子的变化情况 (a) Cu/4H-SiC;(b) Ni/4H-SiC

Fig. 2 Annealing temperature dependence of barrier height on ideality factor for different metal/4H-SiC (a) Cu/4H-SiC;(b) Ni/4H-SiC

3.2 C-V 特性

势垒高度也可以通过测量电容来决定,当小的交流电压叠加到直流偏压上时,一种符号的电荷感生在金属表面,而符号相反的电荷则感生在半导体中. C 和 V 的关系如(2)式表示^[10]

$$\phi_B = V_1 + \xi + \frac{kT}{q} - \Delta\phi \quad (2)$$

这里 V_1 是电压截距; ξ 是费米能级与导带之间的电势差; $\Delta\phi$ 为镜像力所引起的 Schottky 势垒高度下降值(取 0.02eV); kT 是热能. ξ 可以由下面的公式估算:

$$\xi = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_c}{N_d}\right) \quad (3)$$

其中 N_c 为导带有效状态密度; N_d 为施主掺杂浓度.

500°C下退火后的 Cu/,Ni/4H-SiC Schottky 接触的电容-电压特性如图3所示.

由图3可以看出, $1/C^2-V$ 曲线基本呈线性,表明 SiC 层掺杂是均匀的,不存在可观的界面层^[11],势垒高度不依赖于电压.由(2)和(3)式计算出 Cu/,Ni/4H-SiC Schottky 接触在 500°C退火后的势垒高度分别是 1.95eV 和 1.83eV .

由于串联阻抗及金属-半导体之间界面氧化薄层的影响,由 $C-V$ 测试所得的势垒高度比实际值偏大^[10].

4 结论

本文讨论了采用磁控溅射的方法在 4H-SiC 样

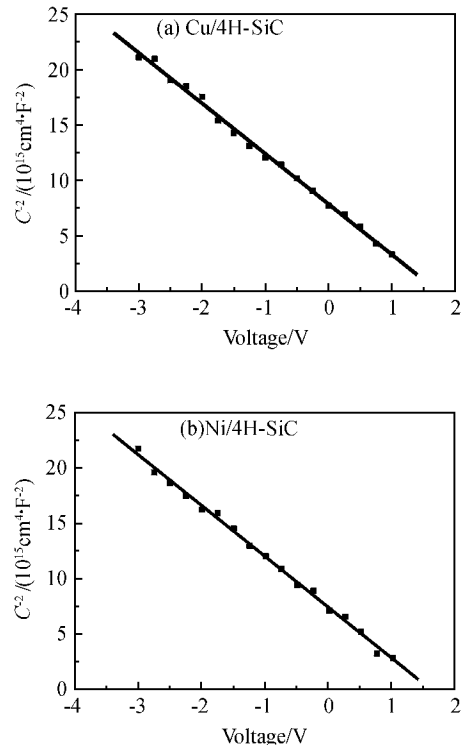


图3 500°C退火后金属/4H-SiC Schottky 接触的 C-V 特性 (a) Cu/4H-SiC;(b) Ni/4H-SiC

Fig. 3 C-V characteristics for different metal/4H-SiC Schottky contacts after 500°C annealing condition (a) Cu/4H-SiC;(b) Ni/4H-SiC

品上沉积 Cu, Ni 金属,以形成 Schottky 接触.通过 $I-V$ 和 $C-V$ 测试得到金属/半导体接触的 Schottky 势垒高度以及理想因子.经不同温度的退火后,研究

不同的退火温度对 Schottky 接触特性的影响. 结果表明, Cu, Ni/4H-SiC 的势垒高度 (SBH) 随退火温度的升高而提高, 但超过某一温度 (Cu/SiC 约为 500°C, Ni/SiC 约为 700°C) 时, 其整流特性变差. 所制备的金属半导体接触界面比较理想, 无强烈费米能级钉扎. 反向 $I-V$ 特性表明, 在反向偏压 100V 下, 暗电流小于 1nA. 拟合结果表明所得金属半导体接触接近理想状态, 和 Schottky-mott 模型符合得较好.

致谢 本工作得到福建省厦门市科技项目和厦门市三优光电有限公司的资助, 厦门大学萨本栋微机电中心为本工作提供了实验环境和设备. 感谢苏丽锦、张春权、陈彬彬等工作人员为器件的制备所提供的帮助.

参考文献

- [1] Saxena V, Su J N, Steckl A J. High-voltage Ni- and Pt- SiC Schottky diodes utilizing metal field plate termination. *IEEE Trans Electron Devices*, 1999, 46(3): 456
- [2] Kestle A, Wilks S P, Dunstan P R, et al. Improved Ni/ SiC Schottky diode formation. *IEEE Trans Electron Lett*, 2000, 36

- (3): 267
- [3] Defives D, Noblanc O, Dua C, et al. Electrical characterization of inhomogeneous Ti/4H-SiC Schottky contacts. *Mater Sci Eng B*, 1999, 61/62: 395
- [4] Hao Yue, Peng Jun, Yang Yinfu. Wide band semiconductor technic of SiC. Beijing: Science Press, 2000; 1 [郝跃, 彭军, 杨银发. 碳化硅宽带隙半导体技术. 北京: 科学出版社, 2000; 1]
- [5] SZE S M. *Physics of semiconductor devices*. John Wiley & Sons, Inc, 1969: 225
- [6] Hatayama T, Kawahito k, kijima H, et al. Electrical properties and interface reaction of annealed Cu/4H-SiC Schottky rectifiers. *Materials Science Forum*, 2002, 389~393: 925
- [7] Mariusz S, Szmids J, Werbowy A, et al. Influence of annealing on reverse current of 4H-SiC Schottky diodes. *Diamond and Related Materials*, 2002, 11: 1263
- [8] Pécz B. Contact formation in SiC devices. *Appl Surf Sci*, 2001, 184: 287
- [9] Michaelson H B. The work function of the elements and its periodicity. *J Appl Phys*, 1977, 48(11): 4729
- [10] Itoh A, Matsunami H. Analysis of Schottky barrier heights of metal/SiC contacts and its possible application to high-voltage rectifying devices. *Phys Status Solidi A*, 1997, 162: 389
- [11] Wang Shurui, Liu Zhongli, Li Guohua, et al. High-voltage Ti/6H-SiC Schottky barrier diodes. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2001, 22(8): 962

Anealing Effect on Cu/, Ni/4H-SiC Schottky Barrier

Yang Weifeng¹, Yang Keqin¹, Chen Xiaping¹, Zhang Feng¹, Wang Liangjun¹, and Wu Zhengyun^{1,2}

(¹ Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

(² MEMS Center, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Schottky barriers are formed by magnetron sputtering the metals (Cu and Ni) on the front side of 4H-SiC (Si face) to study the rectifying characteristics of the contacts between the metals and 4H-SiC. The effects on the annealing under different temperatures are also investigated. Schottky barrier height (SBH) and ideal factor of metal/4H-SiC are evaluated from the $I-V$ and $C-V$ measurements. After annealing, the SBH of Cu/SiC and Ni/SiC increased. But when the annealing temperature is higher than 500°C for Cu/SiC, 700°C for Ni/SiC, the rectifying characteristic of samples degrades. The reverse leaky current is low whether or not annealing. No strong Fermi pinning is found and the interfaces between metal and 4H-SiC are in good quality.

Key words: 4H-SiC; Schottky barrier height; annealing

PACC: 7340N; 7340V **EEACC:** 2530D; 2520M; 2550A

Article ID: 0253-4177(2005)S0-0277-04