

Ni/4H-SiC 肖特基势垒磁场下输运性质的分析*

杨 威, 李 广, 李晓光**

(中国科学技术大学结构分析重点实验室和材料科学与工程系, 合肥 230026)

谢家纯, 徐 军

(中国科学技术大学物理系, 合肥 230026)

摘 要: 采用高真空电子束蒸发的方法将镍(Ni)淀积在 4H-SiC(0001)面上, 制备出良好的 Ni/4H-SiC 肖特基接触. 研究了 Ni/4H-SiC 肖特基势垒在强磁场和低温下的 $I-V$ 特性, 并以热电子发射理论为基础, 结合弛豫近似玻尔兹曼方程对 Ni/4H-SiC 肖特基势垒在磁场下的输运性质进行了分析和计算, 发现电流的变化与磁场的平方和电压成线性关系, 和温度成反比关系, 与实验结果基本符合.

关键词: SiC; 高真空电子束蒸发; 肖特基接触; 势垒; 磁场

中图分类号: O649, TN311+.7 文献标识码: A

Current Transport Under High Magnetic Fields in Ni/4H-SiC Schottky Barrier*

Yang Wei, Li Guang, Li Xiaoguang

(a. Structure Research Laboratory, Department of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Xie Jiachun, Xu Jun

(b. Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract Ni/4H-SiC Schottky contacts with good characteristics were fabricated using electron beam evaporation to deposit Ni on 4H-SiC ((0001) Si face). Current-voltage ($I-V$) characteristics of Ni/4H-SiC Schottky barrier have been studied in the temperature range from 160 K to 300 K in magnetic fields (B) up to 10 T. The thermionic emission theory and relaxation time approximation Boltzmann equation were employed to calculate the $I-V$ characteristics, and it is found that the change of current shows a linear relation with B^2 and V , and is inversely proportional to the temperature, which well agrees with experimental results.

Keywords SiC, Schottky contacts, Barrier, Magnetic fields

1 引言

第三代宽禁带半导体 SiC 材料由于具有宽禁带、高临界电场、高电导率、高载流子饱和漂移速度、耐腐蚀性强等特点, 在高温、高频、大功率、光电子及

抗辐射等领域比传统的 Si 材料具有极大的应用潜力^[1,2]. 但由于 SiC 单晶和外延材料制备上的困难, 对 SiC 器件的研究一直未能深入开展. 直到 20 世纪 90 年代 6H-SiC 和 4H-SiC 单晶材料相继实现商品化之后, 以 SiC 材料为基础的高性能微电子器件才

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (50132040).

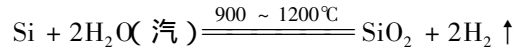
** Corresponding author, E-mail: lixg@ustc.edu.cn Received 2 May 2003; in final form 10 September 2003.

成为国际上微电子领域的一个研究热点^[3-5]. 大量的可应用于功率电子、光电子、微电子和微波领域的 SiC 器件已研制成功, 其中包括肖特基二极管在内的许多器件已达到商业应用水平^[6-8]. 国内对 SiC 器件的研究起步较晚, 但也已取得了显著的进展^[9-11]. 由于实际应用对器件越来越高的要求, 很多研究小组对肖特基势垒接触的制备和性质展开了进一步的研究^[12-15]. 但是到目前为止, 金属/SiC 肖特基接触的形成机制仍未完全阐明^[14,16,17]. 大多数的研究表明, 接触界面处并不存在由界面处表面态钳制作用引起的费米能级钉扎效应, 所以一般认为肖特基模型是正确的^[14,15,18]. 由于 SiC 器件在强场、高频、大功率、高压等极端条件下有着广阔的应用前景, 所以我们有必要研究其在这些极端条件下的性质. 虽然已经有一些研究小组对 SiC 肖特基势垒在低温下的性质进行了研究^[15-18], 但到目前为止, 人们对于 SiC 肖特基势垒在磁场下的输运行为尚不清楚. 在本工作中, 我们测量了 Ni/4H-SiC 肖特基势垒在强磁场和低温下的输运性质, 并对肖特基势垒在磁场下的输运性质进行了初步的分析和计算.

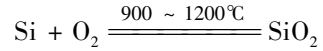
2 实 验

实验所用的材料为从美国 Cree 公司购买的 N^+N 型的 4H-SiC(0001) Si 面) 外延片. N^+ 层为高掺杂衬底, 厚度为 300 μm , 电导率为 0.014 Ωcm . N 型外延层厚度为 10 μm , 掺杂浓度为 $3.3 \times 10^{15} / \text{cm}^3$. 首先用超声清洗晶片, 然后用 1 号和 2 号液清洗(1 号清洗液即碱性过氧化氢清洗液, 是由去离子水、30% 的过氧化氢和 25% 的浓氨水按比例混合而成, 它们的体积比为: $\text{H}_2\text{O} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{NH}_4\text{OH} = 5 : 1 : 1$ 到 $5 : 2 : 1$. 2 号清洗液即酸性过氧化氢清洗液, 是由去离子水、30% 的过氧化氢和 37% 的浓盐酸按比例混合而成, 它们的体积比为: $\text{H}_2\text{O} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{NH}_4\text{OH} = 6 : 1 : 1$ 到 $8 : 2 : 1$), 再用高纯冷热处理去离子水清洗. 之后进行有源区氧化、光刻. 在高真空中使用电子束蒸发在 N 外延层淀积 1 μm 的 Ni, 之后氮气保护下 500 $^\circ\text{C}$ 退火 5 min, 形成肖特基接触. 为与 4H-SiC 形成良好的欧姆接触, 需采用功函数大(化学势较低)的金属做欧姆接触电极. 在高真空中使用电子束蒸发在 N^+ 层上淀积总厚度为 1.2 μm 的 Ti、Ni、Ag 作欧姆接触电极, 然后在氮气保护下 950 $^\circ\text{C}$ 退火 10 min, 以形成合金欧姆接触. 由于 SiC 能够被氧化成 SiO_2 , 所以可以采用成熟的硅工艺技术. 但是与硅相

比, SiC 的氧化速率明显减少, 且 SiC(0001) C 面、Si 面的氧化速率明显不同. SiC 氧化层的生长和质量上的差异还与 SiC 的表面取向、SiC 硅多型结构、晶向、缺陷密度以及掺杂浓度相关. 在热氧化时, 一般氧化气氛有水蒸汽、干氧和湿氧. 水蒸汽氧化的反应式为:



水蒸汽的氧化速率虽然较快, 但氧化膜质量不高, 稳定性不好, 而且对于杂质的掩蔽能力也较差. 所以水蒸汽氧化方法没有得到广泛的应用. 干氧氧化的反应式为:



由于水分子在 SiO_2 中的扩散系数比氧气大 1000 倍以上, 所以水蒸汽氧化的速率较大. 干氧氧化的速率虽然较低, 但生长出的氧化层结构致密, 掩蔽能力较强. 而且由于其干燥、致密的特点, 与光致抗蚀剂接触良好, 光刻时不易产生浮胶现象. 综合以上因素和文献调研结果, 我们在 SiC 器件制备时, 有源区氧化采取了干氧湿氧结合的方法. 氧化过程为: 干氧 10 min + 8 h 湿氧 + 干氧 20 min(炉温为 1150 $^\circ\text{C}$). 最后进行划片、烧结、压焊和封装.

本实验中磁场由牛津公司 98PAIDA-I2006GB 型超导磁体系统提供, 使用晶体管特性测试仪进行了磁场从零场到 10 T, 温度范围在 300 ~ 160 K 的 $I - V$ 特性测试(磁场垂直于电流方向).

3 结果和讨论

图 1 是没加磁场时 300 ~ 160 K 的 $I - V$ 曲线, 随着温度的下降, $I - V$ 曲线单调地向高阻方向移动, 但直到 160 K 时仍然保持较好的整流特性. 当有外加磁场时, 电流会产生相应的变化. 我们定义电流的相对变化为:

$$\Delta j/j = (j_B - j)/j \quad (1)$$

式中 j 和 j_B 分别是无磁场和有磁场时的电流. 图 2 是 300 和 160 K 时, 不同电压下电流相对变化的绝对值 ($\Delta j/j$) 与磁场关系图. 可以看到加磁场后, 电流变小, 且 $\Delta j/j$ 的绝对值随着磁场的增大而增大, 并与磁场的平方 (B^2) 近似成线性关系. 图 3 是不同磁场下 $|\Delta j/j|$ 与电压的关系. 随着电压的增加, $|\Delta j/j|$ 近似线性地增大, 且磁场越大 $|\Delta j/j|$ 增长的越快(斜率更大). 图 4 是 $|\Delta j/j|$ 与温度倒数 ($1/T$) 关系图, $|\Delta j/j|$ 与 $1/T$ 近似呈线性关系.

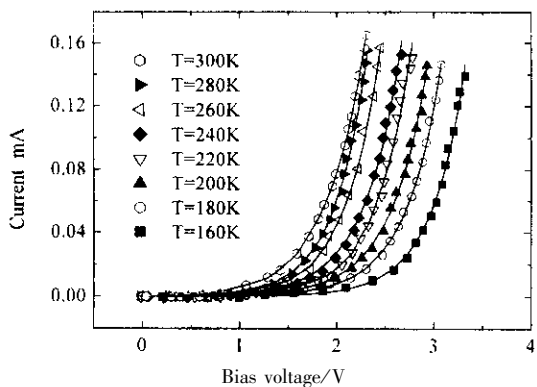


图 1 零场时 Ni/4H-SiC 正向 $I-V$ 温度特性曲线
实线为拟合曲线.

Fig.1 Forward $I-V$ characteristics of Ni/4H-SiC Schottky diode versus temperature in zero magnetic field
Solid lines are theoretical characteristics.

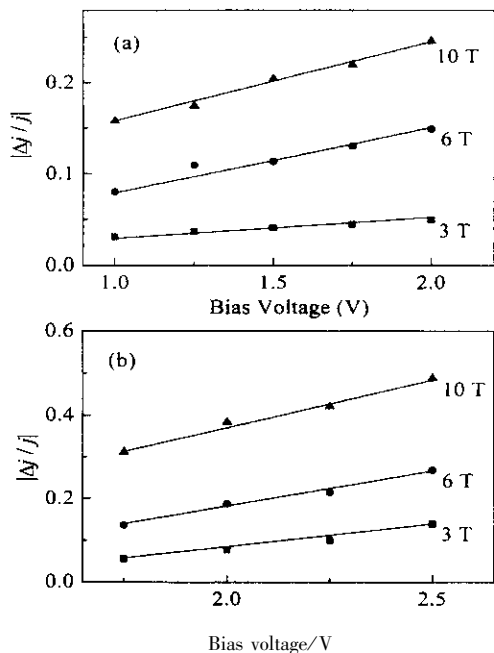


图 3 不同磁场下电流的相对变化的绝对值与电压的关系
Fig.3 Voltage dependence of relative variations of current at different magnetic fields
(a) 300 K ; (b) 160 K.

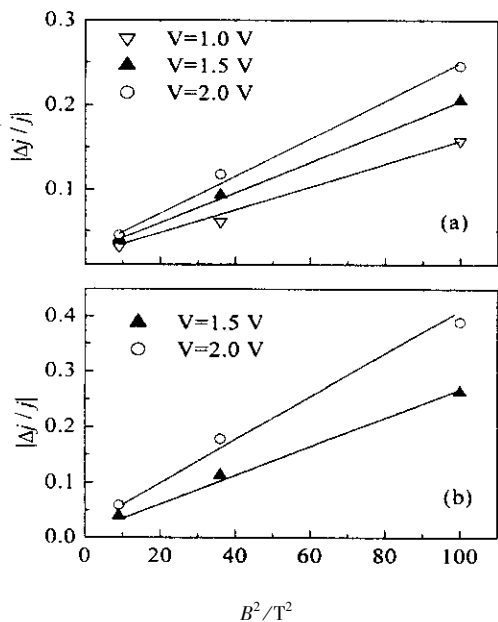


图 2 不同电压下电流的相对变化的绝对值与磁场的关系
Fig.2 Field dependence of relative variations of current at different bias voltages
(a) 300 K ; (b) 160 K.

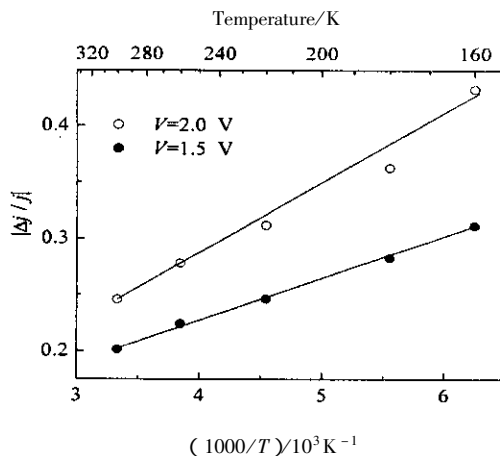


图 4 10 T 时不同电压下电流的相对变化的绝对值与温度的关系
Fig.4 Temperature dependence of the relative variations of current at different bias voltages under 10 T

一般金属/SiC 肖特基势垒的输运性质都用热电子发射理论来解释^[14,15,18],而金属/SiC 肖特基势垒在磁场下的输运性质及解释到目前为止尚不清楚.我们就以热电子发射理论为基础对磁场下 Ni/4H-SiC 肖特基势垒的输运性质进行初步的分析和计算,并与实验结果进行比较.

图 5 是肖特基势垒接触的能带图, E_0 是真空能级, E_{F_m} 和 E_{F_s} 分别是金属和半导体中的费米能

级, W_m 和 W_s 分别是金属和半导体中的功函数, E_C 是导带底能级, χ 是半导体的亲和能, ϕ_m 是 Ni 和 4H-SiC 接触势垒高度, V_D 是金属和半导体功函数之差,称为自建势.

热电子发射理论认为只有满足条件:

$$v_x > \sqrt{\frac{2q(V_D - V)}{m}}$$

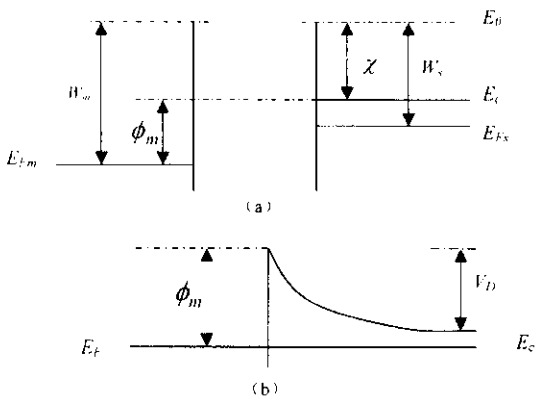


图 5 金属半导体肖特基接触势垒能带图

(a) 孤立金属和半导体的能带图 (b) 接触势垒.

Fig. 5 Energy band diagram of Ni/4H-SiC Schottky contacts

(a) Energy band diagram of separate metal and semiconductor (b) Schottky contact barrier.

$$\text{或 } k_x > \sqrt{\frac{2mq(V_D - V)}{\hbar^2}} \quad (2)$$

的电子才能越过势垒,发射到金属中. 式中, v_x 和 k_x 为电子在 x 方向的速度和波矢; V 为外加电压; \hbar 为普朗克常数; m 为电子的有效质量. 对这部分电子积分,可求得从半导体发射到金属的电流 j_{sm} 为:

$$j_{sm} = q \int_{-\infty}^{+\infty} dk_y \int_{-\infty}^{+\infty} dk_z \int_{\sqrt{\frac{2mq(V_D - V)}{\hbar^2}}}^{+\infty} \frac{\hbar k_x}{m} f_0 dk_x \quad (3)$$

把电子能量统计分布函数 f_0 代入,

$$f_0 = \exp\left(-\frac{\hbar^2(k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)}{2mk_B T} - \frac{E_c - E_F}{k_B T}\right)$$

可得:

$$j_{sm} = j_0 \exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) \quad (4)$$

其中:

$$j_0 = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_m}{k_B T}\right), A^* = \frac{4\pi q k_B^2 m}{\hbar^3}$$

其中, j_0 为反向饱和漏电流; A^* 为有效理查逊常数; k_B 为玻尔兹曼常数. 金属发射到半导体中的电流 j_{ms} 可由零偏压下的 j_{sm} 得到. 在零偏压下这两者大小相等,方向相反,即有 $j_{sm} = -j_{ms}$,于是求得热发射电流为:

$$j = j_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right] \quad (5)$$

我们注意到在热电子发射理论中忽略了磁场作用下电子按能量分布函数的变化,直接使用平衡时的电子统计分布 f_0 代入式(3)中进行计算. 但在强磁场下,我们不能再忽略分布函数的变化. 利用弛豫近似

玻尔兹曼方程,可求得分布函数的变化^[19]:

$$\begin{aligned} \varphi(k) &= f - f_0 \\ &= \frac{q\tau}{\hbar} \nabla_{\mathbf{k}} [f_0 + \varphi(k)] \end{aligned} \quad (6)$$

取其二级近似,可得:

$$\varphi_{(2)}(k) = q\tau \frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} V \left[E - \left(E \times \frac{q\tau}{m} B \right) \times \frac{q\tau}{m} B \right] \quad (7)$$

其中 τ 和 B 分别为电子平均碰撞时间和磁感应强度的大小. 将 $f = f_0 + \varphi(k)$ 代入方程(3)可求得因外加磁场所引起的电流变化为:

$$\begin{aligned} \Delta j &= \mu^3 q^2 k_B m T \sqrt{\frac{N_A^* m}{\varepsilon \varepsilon_0}} (V - V_D) \times \\ &B^2 \exp\left(-\frac{\phi_m}{k_B T}\right) \exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

其中:

$$N^* = \frac{N_A N_B}{N_A + N_B}$$

N^* 为约化浓度, N_A 和 N_B 分别为界面两边的掺杂浓度. 而 μ 、 ε 和 ε_0 分别为电子的迁移率、半导体材料的介电系数和真空介电常数. 考虑到 $\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) \gg 1$, Δj 与未加磁场时电流 j 的比为:

$$\frac{\Delta j}{j} = \frac{2\mu^3 q}{k_B} \sqrt{\frac{N^* m}{\varepsilon \varepsilon_0}} (V - V_D) \frac{B^2}{T} \quad (9)$$

这里由于是金属和半导体接触, N^* 可以近似用半导体的掺杂浓度代替. 把 SiC 的迁移率 ($\mu_e = 900 \text{ cm}^2/\text{V s}$ ^[20]) 和掺杂浓度代入,可求出当 $B = 10 \text{ T}$ 时 $|\Delta j/j|$ 的数量级为 10^{-1} . 由(9)式可知, $|\Delta j/j|$ 与磁场的平方和外加电压成正比,与温度成反比,这分别与图 2、图 3、图 4 的结果是基本一致的,说明我们使用肖特基模型结合弛豫近似玻尔兹曼方程进行计算是合理的. 由(9)式还可以看出, $|\Delta j/j|$ 与金属或半导体的功函数并没有直接联系,而是与金属和半导体的功函数之差 V_D 成线性关系.

我们关于存在磁场时肖特基势垒输运性质的讨论,是基于理想的肖特基模型,忽略了实际情况下可能会出现势垒空间分布^[21]、串联电阻等因素,所以进一步的讨论尚待进行.

4 结 论

我们研究了 Ni/4H-SiC 肖特基势垒在强磁场和低温下的输运性质,并以热电子发射理论为基础结

合弛豫近似玻尔兹曼方程对肖特基势垒在磁场下的输运性质进行了初步的分析和计算,发现电流的变化与磁场的平方和电压成线性关系,和温度成反比关系,与实验结果基本符合.

参 考 文 献

- [1] Shenai K , Scott R S , Baliga B J. *IEEE Trans. Electron Devices* , 1989 , **36** : 1811
- [2] Hisaomi I , Kohei M I , Gerhard P , *J. Appl. Phys.* , 2000 , **88** : 1956
- [3] Wahab Q , Ellison A , Zhang J , *et al. Mater. Sci. Forum* , 2000 , **338 - 342** : 1171
- [4] Porter LM , and Davis RF , *Mater. Sci. Eng. B* , 1995 , **34** : 83
- [5] Bhatnagar M , Baliga B J , Kirk H R , *et al. IEEE Trans. Electron Devices* , 1996 , **43** : 150
- [6] Johnson C M , Wright N G , Uren M J , *et al. IEE Proc-Circuit Devices Syst.* , 2001 ; **148** : 101
- [7] Singh R , Cooper J A , Melloch M R , *et al. IEEE Trans. Electron Devices* , 2002 , **49** : 665
- [8] Rao M V , Griffiths P , Holland O W , *et al. J. Appl. Phys.* , 1995 ; **57** : 2479
- [9] Zhang Yuming (张玉明) , Zhang Yimen (张义门) , Luo Jinsheng (罗晋生). *Chinese Journal of Semiconductors* (半导体学报) , 1999 , **20** : 1040
- [10] Xu Jun (徐军) , Xie Jiachun (谢家纯) , Dong Xiaobo (董小波) , *et al. Journal of University of Science and Technology of China* (中国科学技术大学学报) , 2002 , **32** : 320
- [11] Chen Youcun (陈友存) , Wang Qibao (王启宝). *Chin. J. Chem. Phys.* (化学物理学报) , 1998 , **11** : 256
- [12] Hatayama T , Suezaki T , Kawahito K , *et al. Mater. Sci. Forum* 2001 , **353 - 356** : 615
- [13] Smith SR , Evwaraye AO , and Mitchel W C. *J. Appl. Phys.* , 1996 , **79** : 301
- [14] Raynaud C , Isoird K , Lazar M. *J. Appl. Phys.* , 2002 , **91** : 9841
- [15] Reddy CV , Fung S , Beling CD , *et al. Inst. Phys. Conf. Ser.* 1996 ; **142** : 669
- [16] Waldrop J R , Grant R W. *Appl. Phys. Lett.* , 1990 , **56** : 557
- [17] Itoh A , Matsunami H. *Phys. Status Solidi* , 1997 , **162** : 389
- [18] Horvath Z J. *Solid State Electronics* , 1995 , **39** : 176
- [19] Ye L X , *Semiconductor Physics* , Advanced Education Press : Beijing , 1983.
- [20] Morkoc H , Strite S , Gao GB , *et al. J. Appl. Phys.* , 1994 , **76** : 1363
- [21] Zhu SY , Van Meirhaeghe RL , Detavernier C , *et al. Solid State Electronics* , 2000 , **44** : 663