

p 型 GaN 的 Ni/Au 合金电极的 $I-V$ 特性*

王彦杰[†] 杨子文 廖 辉 胡成余 潘尧波 杨志坚 章 蓓 张国义 胡晓东

(北京大学物理学院宽禁带半导体研究中心, 北京 100871)

摘要: 运用传输线方法(TLM)测量了 p 型 GaN 合金后的 Ni/Au 电极的接触电阻率和电流-电压($I-V$)关系, 推导了合金的 Ni/Au 电极和 p 型 GaN 接触处的电流密度与电压($J-V$)的关系. 在考虑热发射机制和镜像力的基础上, 通过对 p 型 GaN 的 Ni/Au 合金电极的 $I-V$ 特性分析, 进一步得出势垒高 $\Phi_b = 0.41\text{eV}$, 受主浓度 $N_a = 4 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$, 能带弯曲 $V_i = 0.26\text{V}$, 和 $E_F - E_v = 0.15\text{eV}$. 这些结果与理论值和其他实验结果符合得很好.

关键词: p-GaN; 传输线; 镜像力; Ni/Au 电极

PACC: 7300; 7340M; 7360L

中图分类号: O472⁺.4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)S0-0372-04

1 引言

GaN 基材料在光电器件, 如发光二极管和短波长激光二极管等方面有重要而广泛的应用^[1,2]. 近年来, GaN 基材料在电子器件, 比如金属-半导体场效应管, 高迁移率电子器件方面, 也受到极大的关注. 然而, 以 GaN 基半导体 pn 结为基础的所有器件, 都涉及到在 p 型 GaN 与金属电极之间难以形成良好的欧姆接触的难题, 这依然是制约 GaN 基器件进一步发展的一个主要因素. 一方面, 由于缺少与 p 型 GaN 功函数匹配的金属材料来消除肖特基势垒; 另一方面, p 型 GaN 中的空穴浓度难以达到 10^{18}cm^{-3} 的数量级来降低势垒厚度, 这就使接触电阻率难以降到 $10^{-4}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 以下. 目前 p 型 GaN 的欧姆接触所使用的最主要材料是合金的 Ni/Au^[3], 但合金的 Ni/Au 与 p 型 GaN 形成欧姆接触的原理仍然存在争论.

为了深入了解合金的 Ni/Au 电极的性质以及对器件传输性质的影响, 我们研究了合金的 Ni/Au 与 p 型 GaN 的接触电阻率的动态变化, 发现随着外加电流的增大, 接触电阻率降低. Onomura 等人以前也发现了类似的行为^[4]. 我们认为此现象应该存在于许多实际的器件中, 因此, 有必要深入研究接触电阻率的变化趋势. 本文采用修正的传输线方法, 考虑热发射机制和镜像力作用, 推导出了 Ni/Au 合金电极和 p 型 GaN 接触处的电流密度与电压($j-V$)的关系; 通过分析 $J-V$ 曲线, 我们得出了载流子的输运机制和电极与 p 型 GaN 接触的能带关系. 在一定

工作电流下的接触电阻率才会对器件有实际的影响.

2 实验

本文使用的外延层是用金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术在蓝宝石衬底的 C 平面上生长的. 首先, 在 550°C 下生长 30nm 的 GaN 缓冲层, 然后在 1050°C 下生长 $1\mu\text{m}$ 的掺 Mg 的 p 型 GaN. 样品生长完成后对其在 800°C N_2 气氛下退火, 从而激活 Mg 受主. 通过 Hall 测量得到样品的空穴浓度和迁移率分别为 $1.0 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 和 $5.7\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$. 实验中采用传输线方法研究样品的输运性质. 用光刻技术和干法刻蚀技术在样品表面刻出孤立的传输线结构的台阶, 再用电子束蒸发镀膜方法在样品表面蒸镀 Ni/Au(20nm/20nm) 电极, 电极大小为 $200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$. 除去光刻胶后放入快速退火炉中, 在 500°C 氧气氛下合金 5min 以形成欧姆接触. 最后, 用 Agilent 4155C 半导体参数分析仪测量传输线结构样品的电流-电压($I-V$)关系.

3 结果与讨论

当电流的变化范围为从 0 到 1mA 时测得样品同一台阶上间距不同的相邻电极间的 $I-V$ 曲线, 如图 1 所示. 各 $I-V$ 曲线的线性度并不一致, 电极间距越小, 线性度越差, 电极间距为 $10\mu\text{m}$ 的 $I-V$ 曲线的线性度最差. 间距越小, 接触电阻与电极间的电阻相比越大, 因而更能显示出接触处的 $I-V$ 特性, 所以我们认为电极与样品间为肖特基接触. 测量 $I-V$

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 60477011, 60476028, 60406007, 60276010)

[†] 通信作者. Email: yjw04@pku.edu.cn

2006-11-24 收到, 2006-12-11 定稿

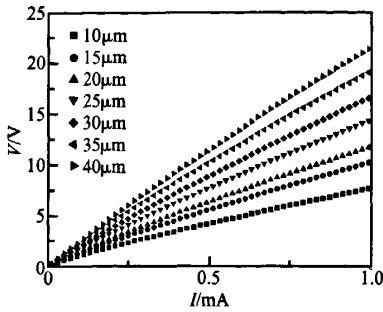


图1 在传输线结构上测得的合金后的 Ni/Au 电极的 I-V
Fig.1 I-V curves of alloy Ni/Au contacts on the TLM structure The area of the electrode was $200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$.

的等效电路可以看成是两个背靠背的肖特基结外加一个串联电阻. 其中一个肖特基结被加以正向偏压, 另一个被加以反向偏压. 在反向肖特基结上的电压降将远大于在正向肖特基结上的电压降, 因此测量的总电阻可简化为: $R_{\text{total}} = R_c + \frac{R_s l}{W}$, 其中 R_c 是由反向的肖特基结造成的接触电阻, R_s 是电极间体材料的薄层电阻, W 是电极宽度, l 是电极间距. (忽略正向肖特基结上的压降将导致 R_c 的值偏大, 然而对计算而言这是一个合理的近似). 通过测量某一电流下不同相邻电极间的电压, 采用传输线方法可以得到接触电阻 ρ_c , 薄层电阻 R_s 和传输长度 L_t , 其中 $\rho_c = R_c W L_t$ [4].

为了研究合金的 Ni/Au 与 p 型 GaN 的接触电阻率的动态变化, 我们测量了不同电流下的接触电阻率, 见图 2. 结果显示当外加电流由 $10\mu\text{A}$ 增加到 1mA 时, 接触电阻率降低了两个数量级, 从 10^{-1} 到 $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$, 这是由接触处的肖特基特性造成的,

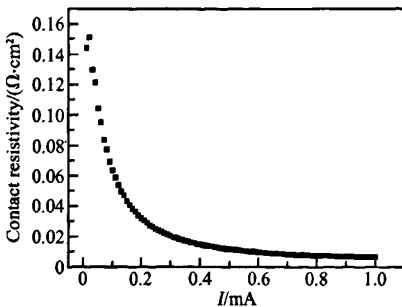


图2 不同外加电流下的接触电阻率曲线 电极面积为 $200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$.
Fig.2 Measured specific contact resistivities under different applied currents

因为 $\rho_c = \frac{\partial V}{\partial j}$. 不仅如此, 还发现 R_s, L_t 都随着外加电流的变化而变化.

根据以上测量的接触电阻率动态变化的数据, 利用 $j = \frac{I}{L_t W}$ 和 $V_c = IR_c$, 不难得出反向肖特基结上的电压降 V_c 与流经电极的电流密度 J 的关系曲线(见图 3). 这一实验曲线关系排除了串联电阻的影响, 因而单纯地反映了反向肖特基结的 J-V 特点.

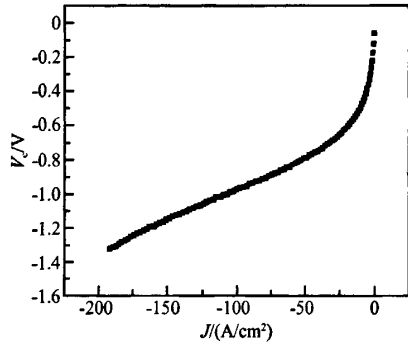


图3 电极与 GaN 接触处的 J-V 曲线
Fig.3 J-V curve of the contact, which reflects a reverse biased Schottky diode

考虑热发射机制^[5,6], 肖特基结的 J-V 关系由如下方程表示:

$$J = J_0 \exp(qV/nk_B T) [1 - \exp(-qV/k_B T)] \quad (1)$$

其中 $J_0 = A^{**} T^2 \exp(-\Phi_b^0/k_B T)$; n 是理想因子; k_B 是 Boltzman 常数; Φ_b^0 是肖特基势垒高; A^{**} 是有效 Richardson 常数, 理论值为 $103.8 A / (\text{cm}^2 \cdot \text{K}^2)$. 空穴的有效质量 $m_h^* = 0.8 m_0$ [5,7]. 由方程(1)可知 $\ln(J/[1 - \exp(-qV/k_B T)]) - V$ 为线性关系. 因此, 从 J-V 实验曲线的直线部分, 由截距可以得到 J_0 , 进而确定 Φ_b^0 , 由斜率则可以得到 n 值. 由此得出 $\Phi_b^0 = 0.41\text{eV}$ 和 $n = 1.13$. 理想因子大于 1 使得 J-V 曲线上没有饱和区. 其原因有多种可能, 最普遍的原因就是势垒高度随外加电压的变化而变化.

我们认为这反向肖特基结的电流没有出现饱和和是由镜像力造成^[8-10]. 考虑镜像力作用, 势垒降低的幅度为:

$$\Delta\Phi_b = \left[\frac{q^3 N_d}{8\pi^2 \epsilon_d^2 \epsilon_r} (V_i - V) \right]^{1/4} \quad (2)$$

此时的电流电压关系为:

$$I = SA^{**} T^2 \exp\left(-\frac{\Phi_b - \Delta\Phi_b}{k_B T}\right) \left(\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1\right) \quad (3)$$

式中 S 是电流流经的面积; V_i 是能带弯曲幅度; ϵ_r ,

是半导体的介电常数, ϵ_d 是镜像力介电常数. 根据文献[8]我们取 $\epsilon_d = \epsilon_s = 9.5\epsilon_0$. 当外加的反向偏压足够大时, 方程(3)中的 $\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$ 与 1 相比可以忽略, 从而简化为:

$$I = -SA^{**}T^2 \exp\left(-\frac{\Phi_b - \Delta\Phi_b}{k_B T}\right) \quad (4)$$

则

$$\ln I = \ln(SA^{**}T^2) - \frac{\Phi_b}{k_B T} + \frac{1}{k_B T} \left(\frac{q^3 N_d}{8\pi^2 \epsilon_s^3}\right)^{1/4} (V_i - V)^{1/4} \quad (5)$$

如果 $-V \gg V_i$, $|V|^{1/4}$ 与 $\ln I$ 将呈线性关系. 图 4 显示的实验曲线反映了 $\ln I$ 与 $|V|^{1/4}$ 的这种线性关系, 从中我们可以看出 $I-V$ 关系与镜像力模型相符, 尤其是在大的反向偏压情况下符合得很好.

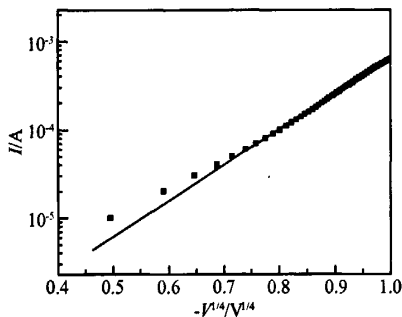


图 4 镜像力模型下的 $I-V$ 关系

Fig. 4 Alloyed Ni/Au characteristics for image force lowering

在此基础上, 可以进一步得到能带弯曲、受主浓度等重要的材料参数. 由图 4 中 $V=0$ 处的截距得到 $\Phi_b = 0.67\text{eV}$. 前面已经得出 $\Phi_b^* = \Phi_b - (\Delta\Phi_b)_0 = 0.41\text{eV}$, 其中 $(\Delta\Phi_b)_0$ 是由方程(2)在 $V=0$ 时给出的镜像力降低值, 因此 $(\Delta\Phi_b)_0 = 0.26\text{eV}$. 将此结果代入方程(2)得出 $V_i = 0.26\text{V}$ 和 $\xi = -(\Delta\Phi_b)_0/q - V_i = 0.15\text{V}$, 即 $E_F - E_V = 0.15\text{eV}$. 另外, 从图 4 中直线的斜率可以得出 $N_a = 4.0 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$. 为了证明拟合结果的准确性, 进一步测量了电容-电压关系 ($C-V$)^[11], 在靠近表面 28nm 的范围内受主浓度约为 10^{19}cm^{-3} , 这一结果与有镜像力模型得出的结果基本一致, 但镜像力模型中的受主浓度略高于 $C-V$ 结果. 由于镜像力模型的样品表面电极进行了合金, 造成镜像力模型中受主浓度更高的原因可能是合金后表面残余的被钝化的 Mg 进一步被激活. 本文采用的修正的传输线方法中, 假设全部电压都将落在反向的肖特基结上, 而忽略了正向的影响, 这将导致

R_c , V_c 和 ρ_c 值偏大, 也导致最终求得的势垒高度偏大. 但这并不会对本文的物理模型产生主要影响, 因此是一个合理的近似.

4 总结

运用传输线方法研究和分析了合金后的 Ni/Au 电极与 p 型 GaN 的 $I-V$ 特性, 发现当测量电流增大时, 接触电阻值在减小. 我们认为这是由于电极与样品之间欧姆接触不良造成的, 也就是肖特基接触. 考虑热发射机制, 得出电极与样品之间势垒高为 0.41eV , 理想因子为 1.13. 肖特基结的反向不饱和特点可以归因于镜像力作用, 由 $\ln I$ 与 $|V|^{1/4}$ 之间的线性关系证明了在本实验中采用镜像力模型是合理的. 从镜像力模型出发, 确定样品受主浓度为 $N_a = 4.0 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$, 这与由 $C-V$ 测量结果在数量级上一致, 但比 $C-V$ 的结果略高, 我们认为这是由于在电极合金的过程中进一步激活了被 H 钝化的 Mg 造成的.

参考文献

- [1] Nakamura S, Senoh M, Iwasa N, et al. High-brightness In-GaN blue, green and yellow light-emitting diodes with quantum well structures. *Jpn J Appl Phys, Part 2*, 1995, 34: L797
- [2] Asif K M, Kuznia J N, Bhatara A R, et al. Metal semiconductor field effect transistor based on single crystal GaN. *Appl Phys Lett*, 1993, 62: 1786
- [3] Ho J K, Jong C S, Chiu C C, et al. Low-resistance ohmic contacts to p-type GaN achieved by the oxidation of Ni/Au films. *J Appl Phys*, 1999, 86: 4491
- [4] Onomura M, Saito S, Sugiura L, et al. The analysis of contact resistivity between a p-type GaN layer and electrode in In-GaN MQW laser diodes. *Mater Sci Eng B*, 1999, 59: 366
- [5] Jang J S, Seong T Y. Electronic transport mechanisms of nonalloyed Pt ohmic contacts to p-GaN. *Appl Phys Lett*, 2000, 76: 2743
- [6] Chen N C, Tseng C Y, Chiu A P, et al. Application of modified transmission line model to measure p-type GaN contact. *Appl Phys Lett*, 2004, 85: 6086
- [7] Jacobs H O, Stemmer A. Measuring and modifying the electric surface potential distribution on a nanometre scale: a powerful tool in science and technology. *Surf Interface Anal*, 1999, 27: 361
- [8] Sharma B L. *Metal-semiconductor Schottky barrier junctions and their applications*. New York: Plenum Press, 1984
- [9] Zeitouny A, Eizenberg M, Pearton S J, et al. Contact resistivity and transport mechanisms in W contacts to p- and n-GaN. *J Appl Phys*, 2000, 88: 2048
- [10] Rideout V L, Crowell C R. Effects of image force and tunneling on current transport in metal-semiconductor (Schottky barrier) contacts. *Solid State Electron*, 1970, 13: 993
- [11] Yu L S, Qiao D, Jia L, et al. Study of Schottky barrier of Ni on p-GaN. *Appl Phys Lett*, 2001, 79: 4536

Current-Voltage Characteristic of Alloyed Ni/Au on p-GaN*

Wang Yanjie[†], Yang Ziwen, Liao Hui, Hu Chengyu, Pan Yaobo, Yang Zhijian,
Zhang Bei, Zhang Guoyi, and Hu Xiaodong

(Research Center of Wide Gap Semiconductors, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: We obtain and analyze specific contact resistivity and current-voltage curve of alloyed Ni/Au on p-GaN by transmission line model (TLM) measurement. I - V (current density-voltage) curve between the alloyed Ni/Au and p-GaN is deduced from the I - V curve. Based on Thermionic Emission Mechanism and Image Force Theory, we get effective barrier height $\Phi_b = 0.41\text{eV}$, acceptor concentration $N_a = 4 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$, band bending $V_i = 0.26\text{V}$, and $E_F - E_v = 0.15\text{eV}$, which agree well with the theoretical values and other experimental results.

Key words: p-GaN; transmission line model; image force; Ni/Au

PACC: 7300; 7340M; 7360L

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0372-04

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 60477011, 60476028, 60406007, 60276010)

[†] Corresponding author. Email: yjw04@pku.edu.cn

Received 24 November 2006, revised manuscript received 11 December 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics