

退火温度和退火气氛对 Ni/Au 与 p-GaN 之间 欧姆接触性能的影响*

李晓静 赵德刚[†] 何晓光 吴亮亮 李亮 杨静 乐伶俐
陈平 刘宗顺 江德生

(中国科学院半导体所, 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

(2013年6月17日收到; 2013年7月16日收到修改稿)

研究了不同退火温度和气氛对 Ni/Au 与 p-GaN 之间欧姆接触性能的影响. 采用圆形传输线模型方法得到不同退火温度和不同退火气氛下的比接触电阻率. 结果表明, 较适宜的退火温度为 500 °C 左右, 退火温度太高或太低都会导致比接触电阻率的增大; 较适宜的退火气氛为适量含氧的氮气气氛, 且氧气含量对比接触电阻率大小的影响并不显著. 经过对退火条件的优化, 得到的比接触电阻率可达 $7.65 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$.

关键词: p-GaN, 欧姆接触, 圆形传输线模型, 快速热退火

PACS: 68.35.Ja, 61.72.uj, 61.82.Bg, 67.25.bh

DOI: 10.7498/aps.62.206801

1 引言

以 GaN 为代表的 III 族氮化物因具有一系列优越的性质, 而成为近年来化合物半导体研究的热点之一. 其禁带宽度大、电子饱和漂移速度高、导热性能良好等特点适合于制作高频、大功率电子器件^[1,2]; 利用其宽的直接带隙可以制作蓝、绿光和紫外光的光电子器件^[3,4]. 但是 GaN 基器件的研制要求金属与半导体之间形成高质量的欧姆接触, 对于 n-GaN 来说, 其上的电极制备通过 Ti/Al 体系可获得比接触电阻率在 10^{-6} — $10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 范围的欧姆接触^[5]. 而对于 p-GaN 来说, 很难实现低比接触电阻率的欧姆接触, 一方面由于很难获得高空穴浓度的 p-GaN, 另一方面是由于缺少合适的金属体系. 因此如何提高 p-GaN 欧姆接触的性能、降低比接触电阻率成为氮化物研究的重点.

p-GaN 与金属形成欧姆接触的质量主要取决于以下几点: p-GaN 的掺杂水平、金属的选择、

接触前 p-GaN 的表面处理情况、退火条件等. 根据文献报道, 受到 Mg 受主较高激活能的限制, p-GaN 掺杂水平很难进一步提高^[6], 在 p-GaN 表面覆盖一层重掺杂的 p^{++} -GaN 盖层有利于提高欧姆接触的性能. 而材料的表面处理可以通过用稀盐酸、王水以及 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 溶液等, 获得较好的处理效果^[7-9]. Ni/Au 是目前欧姆接触研究选用较多的金属之一^[10-14]. 在此基础上, 选用合适的退火条件可以将欧姆接触的比接触电阻率进一步降低, 所以退火条件的选择有其特殊的重要性, 退火条件主要包括退火温度和退火气氛. 本文采用圆形传输线模型 (circular transmission line model, CTLM) 方法得到了不同条件下的比接触电阻率, 对 Ni/Au 与 p-GaN 形成欧姆接触所需要的退火温度和退火气氛进行了研究, 并得到了优化的工艺条件.

2 测试所用材料结构及 CTLM 方法

图 1(a) 为测试所用的材料结构示意图. 如图

* 国家杰出青年科学基金 (批准号: 60925017)、国家自然科学基金 (批准号: 10990100, 61176126) 和清华大学信息科学与技术国家实验室 (筹) 学科交叉基金资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: dgzhao@red.semi.ac.cn

1(a) 所示, 在 c 面蓝宝石衬底上采用金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 方法进行材料生长, Ga 源、N 源和 Mg 源分别为三甲基镓 (TMGa)、 NH_3 和二茂镁 (Cp_2Mg), 载气为 H_2 . 采用约 20 nm 的 GaN 缓冲层, 然后生长 2 μm 厚的非故意掺杂的 GaN 层, 再生长 1 μm 的中等掺杂浓度的 p-GaN, 温度为 1070 $^\circ\text{C}$; 之后生长 25 nm 的重掺杂的 p^{++} -GaN 盖层, 温度为 900 $^\circ\text{C}$; 最后, 在温度为 800 $^\circ\text{C}$ 、纯 N_2 环境中退火 20 min 进行 Mg 受主激活.

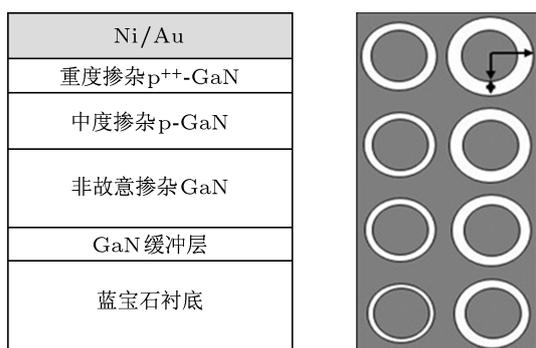


图 1 测试所用材料结构示意图 (a) 和用 CTLM 测试形成电极图形的俯视图 (b)

CTLM 方法^[15]需要在材料表面制作一组圆形电极, 每个圆形金属电极的半径 (r) 相同, 为 200 μm . 在圆形金属电极外留下一个圆环状的空白区域, 而且每个圆环的外径 (R) 是逐渐减小的, 从大到小依次为 260, 250, 240, 235, 230, 225, 220, 215 μm , 由此可得圆环的宽度 d 分别为 60, 50, 40, 35, 30, 25, 20, 15 μm . 也就是说圆环的宽度 (d) 是逐渐减小的, 在圆环外是大面积的金属.

在上述结构的 p-GaN 外延片上制作光刻胶掩膜图形, 然后采用热蒸发方法依次蒸镀上 Ni/Au 双层金属薄膜, 厚度依次为 15 nm/50 nm, 最后剥离掉外延片上的光刻胶掩膜, 形成如图 1(b) 所示的电极图形. 之后分别采用不同的退火条件进行快速热退火.

实验中测量仪器为 Keithley 6430, 将源表的正负极分别接在每个圆环的两侧, 测量被圆环隔开的圆点电极与大面积电极之间的电阻, 该电阻 (R_t) 由圆环两侧的接触电阻和半导体材料的体电阻构成, 可表示为

$$R_t = \frac{R_{\text{sh}}}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{R}{r}\right) + L_t \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{r} \right) \right], \quad (1)$$

其中 R_{sh} 为半导体材料的方块电阻 (单位为 Ω/\square); L_t 为传输距离, 它与方块电阻和比接触电阻率

ρ_c (单位为 $\Omega\cdot\text{cm}^2$) 有关, 可表示为

$$\rho_c = L_t^2 R_{\text{sh}}. \quad (2)$$

通过测量每一个圆环两侧电极之间的 I - V 曲线, 计算出其总电阻值 R_t . 然后根据 (1) 式, 以 $\ln(R/r)$ 为横坐标, R_t 为纵坐标, 可做 8 个点的散点图, 然后对它们进行最小二乘法拟合, 从而得到一条描述 R_t - $\ln(R/r)$ 关系的直线, 该直线的斜率 K 与半导体材料的方块电阻 R_{sh} 的关系可表示为

$$R_{\text{sh}} = 2\pi K. \quad (3)$$

同时该直线与纵坐标的交点 (截距) 设为 R_0 , 那么当总电阻值 $R_t = R_0$ 时, 其横坐标 $\ln(R/r) = 0$, 也即 $R = r$, 代入 (1) 式, 可得:

$$R_0 = \frac{R_{\text{sh}}}{2\pi} \times L_t \times \frac{2}{r} = \frac{R_{\text{sh}} L_t}{\pi r}. \quad (4)$$

因此可求得传输距离 L_t 为

$$L_t = \pi r R_0 / R_{\text{sh}}. \quad (5)$$

将 (3) 和 (5) 式代入 (2) 式中可得欧姆接触的比接触电阻率 ρ_c 为

$$\rho_c = \left(\frac{\pi r R_0}{R_{\text{sh}}} \right)^2 R_{\text{sh}} = \frac{\pi r^2 R_0^2}{2K}, \quad (6)$$

由 (6) 式可知, 只要知道拟合直线的斜率 K 和截距 R_0 , 就可求得欧姆接触的比接触电阻率 ρ_c .

3 测试结果与讨论

首先研究不同退火温度对上述样品欧姆接触性能的影响. 将一片蒸上 Ni/Au 电极的样品依次进行不同温度的退火, 温度从低到高依次为 450, 470, 490, 500, 510, 530, 550 $^\circ\text{C}$. 其他退火条件保持一致, 气氛为 $\text{N}_2 : \text{O}_2 = 2 : 1$, 时间为 5 min. 每次退火完成后测试同一个位置的八个环的 I - V 曲线, 测试结果显示, 450 $^\circ\text{C}$ 条件下退火得到的为非欧姆接触, I - V 曲线弯曲较严重. 从 470 $^\circ\text{C}$ 开始得到的为欧姆接触, I - V 曲线为直线.

以外径为 230 μm 的圆环的 I - V 曲线为例, 如图 2 所示, 450 $^\circ\text{C}$ 的退火温度下得到的 I - V 曲线弯曲较严重, 加上电压后产生的电流相对较小, 不是欧姆接触. 根据 CTLM 方法, 当 I - V 曲线为非直线的情况时不能通过上述方法计算 ρ_c . 470 $^\circ\text{C}$ 退火条件下的 I - V 曲线成为直线, 随着温度的升高, 该直线的斜率随之增大, 相同电压下产生的电流也随着增大, 直到 500 $^\circ\text{C}$ 退火条件下, 得到的 I - V 曲线的斜率达到最大, 产生的电流也达到峰值. 当退火温度

进一步升高时, I - V 曲线斜率则会随之减小, 电流也会随之降低.

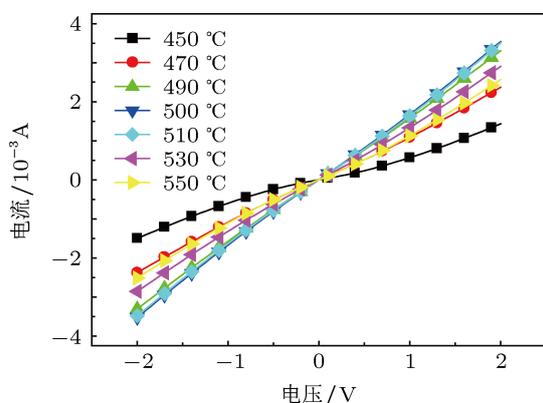


图2 外径为 230 μm 的圆环在不同退火温度条件下得到的 I - V 曲线

以 490 $^{\circ}\text{C}$ 退火条件下得到的八条 I - V 曲线为例, 说明 CTLM 方法得到 ρ_c 的过程, 八个环的八条 I - V 曲线如图 3 所示, 随着圆环外径的增大直线的斜率逐渐减小, 相同电压下产生的电流也逐渐减小. 根据 CTLM 方法理论, 通过这八条 I - V 曲线, 可以分别计算得到八个总电阻值 R_t , 做 R_t 关于 $\ln(R/r)$ 的散点图, 对得到的这八个散点进行最小二乘法拟合, 得到一条 R_t - $\ln(R/r)$ 的直线关系, 如图 3 中插图所示, 从而得到拟合出的直线的斜率 K 和截距 R_0 依次为 $K = 3277.32$, $R_0 = 136.668$. 分别代入 (6) 式得到比接触电阻率 $\rho_c = 3.58 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$.

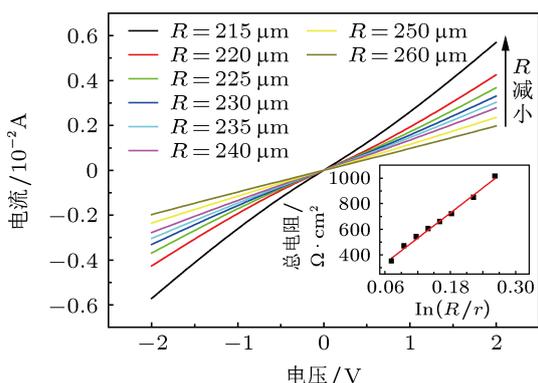


图3 退火温度为 490 $^{\circ}\text{C}$ 条件下测得的外径不同的八个圆环的 I - V 曲线, 插图为测得的八个圆环的总电阻 R_t 以及拟合得到的 R_t - $\ln(R/r)$ 的函数关系

比接触电阻率与退火温度的函数关系如图 4 所示. 当在 490—510 $^{\circ}\text{C}$ 退火温度范围内, 形成的欧姆接触的比接触电阻率是较低的, 也就是说形成的欧姆接触的性能是较好的. 考虑到实际退火过程中, 快速退火炉的温度可能会有一定程度的偏差, 所以

较优的退火温度应该设定在 500 $^{\circ}\text{C}$.

实验结果表明: 退火温度太高或太低都会导致比接触电阻率的增大, 只有在 500 $^{\circ}\text{C}$ 左右的温度下退火才能得到比接触电阻率较低的欧姆接触. 其原因可以解释为退火过程中金属层的 Ni 会与 O_2 反应生成 NiO, 它具有 p 型半导体性质, 在金属和 p-GaN 之间起到了降低势垒高度的作用 [10,13,16], 当温度太低时, 不利于 NiO 的生成 [8], 导致金属与半导体之间形成较高的势垒, 阻碍了载流子的传输; 而当温度太高时, Ni 会与 p-GaN 反应生成 Ni_3Ga_4 , 不利于形成好的欧姆接触 [8].

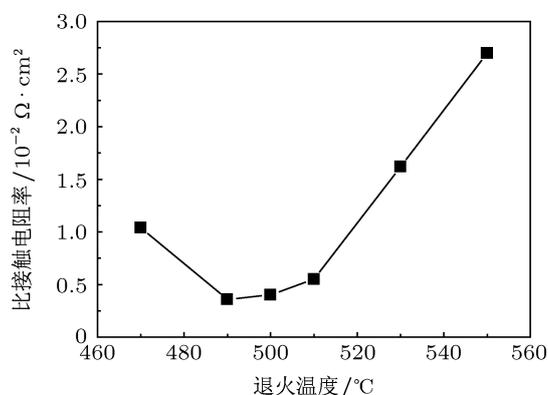


图4 通过 CTLM 方法得到的比接触电阻率与退火温度的函数关系

我们还研究了不同退火气氛对上述样品欧姆接触性能的影响. 分别在六种不同氮气和氧气比例的气氛下快速退火, $\text{N}_2 : \text{O}_2$ 的值依次为 0 : 1, 1 : 1, 2 : 1, 3 : 1, 4 : 1, 1 : 0. 快速热退火的其他条件都保持一致, 退火温度为 500 $^{\circ}\text{C}$, 时间为 5 min. 图 5 所示为外径最小 ($R = 215 \mu\text{m}$) 的圆环在不同气氛退火条件下的 I - V 曲线. 可以看出, 当 $\text{N}_2 : \text{O}_2$ 的值为 0 : 1, 1 : 1, 2 : 1, 3 : 1, 4 : 1 时, 它们的 I - V 曲线基本重合, 都为斜率较大的直线. 只有在纯 N_2 条件下退火得到的 I - V 曲线弯曲较严重, 而且产生的电流较小.

对其他尺寸的圆环的 I - V 曲线进行了测试, 其变化规律与外径最小的圆环一致. 这些测试结果表明: 纯 N_2 气氛下退火不利于欧姆接触的形成, 只有在含 O_2 的氛围中退火才能得到性能较好的欧姆接触, 而且欧姆接触性能的优劣与 O_2 含量的多少并没有明显的关系. 不同 O_2 含量的气氛下退火得到的比接触电阻率如图 6 所示, 其值的上下浮动基本在测量误差范围之内.

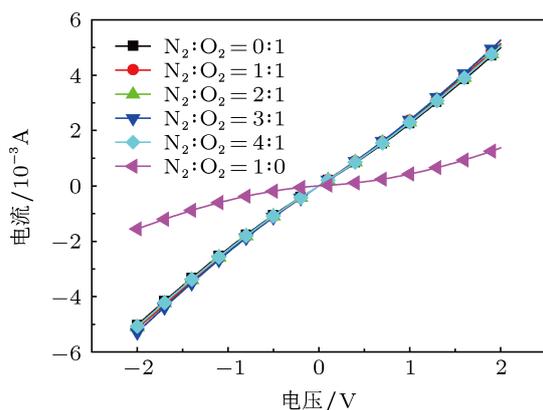


图5 外径最小 ($R = 215 \mu\text{m}$) 的圆环在不同气氛的退火条件下测得的 I - V 曲线

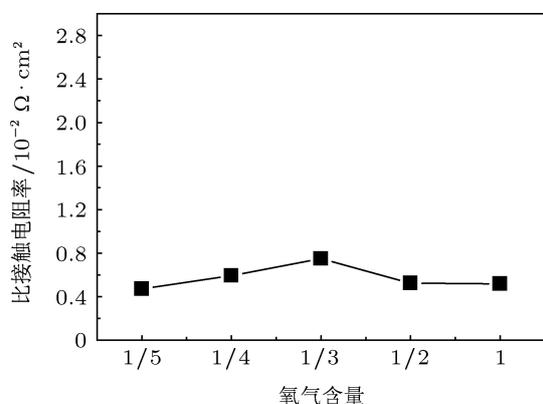


图6 通过 CTLM 方法得到的比接触电阻率与退火气氛中 O_2 含量的关系

实验结果表明: O_2 在欧姆接触的形成过程中起到了很重要的作用. 这主要是由于以下几方面的原因: 1) O_2 与金属 Ni 发生反应生成 NiO; 2) O_2

在退火过程中会与 Mg-H 络合物中的 H 反应生成 H_2O , 有利于 H 的解吸附, 提高空穴浓度^[12]; 3) O_2 与 Ni 反应的过程中会带走 p-GaN 表面的污染物, 有利于降低金半接触形成的势垒高度^[12,17]; 4) O_2 与金属 Ni 和 p-GaN 反应会生成 Ni-Ga-O 非晶相, 这种非晶相的存在也有利于欧姆接触的形成^[10,12].

最后, 根据研究结果对退火条件进行了选择. 我们采用优化的退火条件, 即退火温度保持在 500°C , 退火气氛为适量含氧的氮气气氛, 时间为 5 min. 对退火后的样品进行测试、计算、拟合, 得到最低的比接触电阻率可达 $7.65 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$.

4 结论

为了使 Ni/Au 与表面盖有重掺杂层的 p-GaN 形成性能良好的欧姆接触, 本文采用 CTLM 方法研究了不同退火温度和不同退火气氛对比接触电阻率的影响, 从而对快速热退火的条件进行了优化, 并得到了较低比接触电阻率的欧姆接触. 研究表明, 退火温度在 500°C 左右时可以获得低的比接触电阻率, 同时获得较大的电流, 退火温度过低或过高都会使比接触电阻率增大、电流减小. 而退火气氛的实验结果表明, 在含有氧气的氮气气氛中退火得到较低的比接触电阻率, 并且增加 O_2 的含量对比接触电阻率的大小没有明显的影响. 最后采用优化后的退火条件得到的比接触电阻率为 $7.65 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$.

- [1] Mayes K, Yasan A, McClintock R, Shiell D, Darvish S R, Kung P, Razeghi M 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 1046
- [2] Li G, Cao Y, Xing H G, Jena D 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 222110
- [3] Butun B, Tut T, Ulker E, Yelboga T, Ozbay E 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 033507
- [4] Xue Z Q, Huang S R, Zhang B P, Chen C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1268 (in Chinese) [薛正群, 黄生荣, 张保平, 陈朝 2010 物理学报 **59** 1268]
- [5] Fan Z, Mohammad S N, Kim W, Aktas Ö, Botchkarev A E, Morkoc H 1996 *Appl. Phys. Lett.* **68** 1672
- [6] Ho J K, Jong C S, Chiu C C, Huang C N, Chen C Y, Shih K K 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 1275
- [7] Zhang A P, Luo B, Johnson J W, Ren F, Han J, Pearton S J 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 3636
- [8] Chary I, Chandolu A, Borisov B, Kuryatkov V, Nikishin S, Holtz M 2009 *J. Electron. Mater.* **38** 545
- [9] Wang L J, Zhang S M, Zhu J H, Zhu J J, Zhao D G, Liu Z S, Jiang D S, Wang Y T, Yang H 2010 *Chin. Phys. B* **19** 017307
- [10] Chen L C, Chen F R, Kai J J, Chang L, Ho J K, Jong C S, Chiu C C, Huang C N, Chen C Y, Shih K K 1999 *J. Appl. Phys.* **86** 3826
- [11] Ding Z B, Wang K, Chen T X, Chen D, Yao S D 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2445 (in Chinese) [丁志博, 王坤, 陈田祥, 陈迪, 姚淑德 2008 物理学报 **57** 2445]
- [12] Qiao D, Yu L S, Lau S S, Lin J Y, Jiang H X, Haynes T E 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 4196
- [13] Smalc-Koziorowska J, Grzanka S, Litwin-Staszewska E, Piotrkowski R, Nowak G, Leszczynski M, Perlin P, Talik E, Kozubowski J, Krukowski S 2010 *Solid State Electron* **54** 701
- [14] Lin Y J 2005 *J. Vac. Sci. Technol. B* **23** 48
- [15] Gregory S, MARLOW, DAS M B 1982 *Solid State Electron* **25** 91
- [16] Liday J, Hotový I, Sitter H, Vogrinčič P, Vincze A, Vávra I, Šatka A, Ecke G, Bonanni A, Breza J, Simbrunner C, Plochberger B 2007 *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* **19** 855
- [17] Greco G, Prystawko P, Leszczyński M, Nigro R L, Raineri V, Roccaforte F 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 123703

Influence of different annealing temperature and atmosphere on the Ni/Au Ohmic contact to p-GaN*

Li Xiao-Jing Zhao De-Gang[†] He Xiao-Guang Wu Liang-Liang Li Liang
Yang Jing Le Ling-Cong Chen Ping Liu Zong-Shun Jiang De-Sheng

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(Received 17 June 2013; revised manuscript received 16 July 2013)

Abstract

In this paper, we investigate the effect of annealing conditions on the characteristic of Ni/Au Ohmic contact to p-GaN. The specific contact resistivities under different annealing temperature and different annealing atmosphere are tested using the circular transmission line model. It is found that the best annealing temperature is about 500 °C. The annealing atmosphere of nitrogen-oxygen gas mixture can lead to lower specific contact resistivity than that of pure nitrogen, and the specific contact resistivity has no relationship with the content of oxygen. Finally, we obtain the lowest specific contact resistivity to be $7.65 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}^2$ at the best annealing temperature and atmosphere.

Keywords: p-GaN, Ohmic contact, circular transmission line model, rapid thermal annealing

PACS: 68.35.Ja, 61.72.uj, 61.82.Bg, 67.25.bh

DOI: 10.7498/aps.62.206801

* Project supported by the National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China (Grant No. 60925017), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10990100, 61176126), and the Cross-Discipline Foundation of Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology (TNList) Cross-Discipline Foundation, China.

[†] Corresponding author. E-mail: dgzhao@red.semi.ac.cn