

氧气氛中 p-GaN/Ni/Au 电极在相同温度不同合金时间下的欧姆接触形成机制和扩散行为*

丁志博 王 坤 陈田祥 陈 迪 姚淑德†

(北京大学物理学院, 北京 100871)

(2007 年 7 月 27 日收到, 2007 年 9 月 1 日收到修改稿)

用卢瑟福背散射/沟道技术研究了 p-GaN 上的 Ni/Au 电极在氧气氛下相同合金温度(500 °C)不同合金时间后的微结构演化, 以揭示欧姆接触的形成机制. 利用背散射随机谱和 RUMP 模拟程序研究了电极金属之间的互扩散, 用沟道谱探测了电极金属中的氧分布. 结合不同合金时间下比接触电阻 ρ_c 的变化, 发现随着合金时间的延长比接触电阻持续降低, 在合金时间 60 s 后降低的速度减慢, Au 扩散到 GaN 的表面, 在 p-GaN 上形成外延结构, O 向电极内部扩散反应生成 NiO 对降低 ρ_c 起到了关键的作用, 表明合金后 Ni/Au 双层电极中层反转效应已经发生, 这种结构变化是形成欧姆接触的有效机制. 在相同合金温度(500 °C)不同合金时间中, 氧气氛中的 p-GaN/Ni/Au 电极在合金时间为 300 s 时形成的欧姆接触效果最佳.

关键词: GaN, 卢瑟福背散射/沟道, 欧姆接触

PACC: 7280E, 4180G, 7340L

1. 引 言

由于 GaN 和其他的 III 族氮化物半导体材料具有高热导率、高迁移率、高击穿电压以及耐腐蚀性好、发光效率高、禁带宽度可在 0.7—6.2 eV 之间连续调节、能量范围覆盖了从可见光到紫外的波段等特点, 因而在发光二极管(LED)和激光二极管(LD)等发光器件中有广泛应用^[1-3], 还可用于制作紫外探测器、高温大功率电子器件及高频器件^[4]. 在 III 族氮化物半导体迅速发展的过程中, 对于 GaN 基半导体器件, 获得稳定的低接触电阻的 p-GaN 欧姆接触对提高光电子和微电子器件的效率和可靠性有着重要意义. 目前, 制作 GaN 基器件 p 型欧姆接触一般采用 Ni/Au 双金属层, 镀金属前的 GaN 表面处理和镀金属后的低温合金化处理是常用的降低接触电阻的方法. 关于合金温度, Chen 等^[5]发现在氧气氛下 500 °C 对 p-GaN/Ni/Au 电极合金能够得到最低电阻的欧姆接触. 此种制备方法一直被广泛采用, 但此方法形成的欧姆接触机制仍在进一步的探讨中. 文献[6]认为, 是 Ga 空位的产生而导致 p 型 GaN 表面空

穴浓度的增加; 文献[7]则认为, 是 NiO 的形成导致金属层对 p 型 GaN 肖特基势垒高度的降低; 文献[8]指出, 界面处外延的 Au/NiO 结构是形成欧姆接触的关键. 由于 Ni/Au 电极在氧化合金过程中相互扩散很严重, 并且 Ni 与氧气会形成 NiO 结构, Au 与 GaN 表面会形成新的外延结构, 观察金属电极微结构的整个演化过程对了解欧姆接触形成机制有着很重要的作用. 卢瑟福背散射(RBS)沟道技术是研究金属电极中相互扩散和微结构变化的有效实验手段, 它能同时获得样品中各元素的含量、层厚以及沿深度扩散的信息. 因此本文利用 RBS 技术对相同的氧化合金温度下(500 °C)不同合金时间的 p-GaN/Ni/Au 电极微结构的演化和金属间的相互扩散及欧姆接触的形成机制进行了详细研究.

2. 实 验

本文所用样品是由金属氧化物化学气相沉积(MOCVD)方法制备掺 Mg 的 p-GaN 薄膜. p 型层厚度为 2.4 μm . 为了激活 Mg 原子, 将样品在氮气氛下于

* 国家自然科学基金(批准号: 30575007)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: sclyao@pku.edu.cn

750 °C退火 25 min,接着通过霍尔测量得到 p-GaN 的空穴浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. 为了用线性传输线方法 (TLM)^[9]测量比接触电阻,用反应离子刻蚀方法将样品表面刻蚀出台阶.在蒸镀电极金属前,将样品在 HCl 与 H₂O 体积比为 1:1 的溶液中浸泡 1 min 以除去 GaN 表面的氧化膜.然后用电子束蒸发设备依次在 p-GaN 样品上镀 Ni(20 nm),Au(20 nm),镀电极时的本底真空度为 $4.3 \times 10^{-6} \text{ Pa}$.电极尺寸为 $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$,电极间距依次为 7,12,17,22,33,37 μm ,图 1 为样品结构示意图.镀好电极后,将样品均匀切割成 5 块在氧气氛下进行合金,合金时间分别为 10,60,180,300,600 s,合金温度都为 500 °C.合金后的样品在间距为 37 μm 的电极之间测量接触的电-电压 ($I-V$) 曲线.比接触电阻 ρ_c 通过 TLM 测量得到.



图 1 MOCVD 方法生长掺 Mg 的 p-GaN/Ni/Au 电极结构示意图

样品的 RBS/沟道实验是在比利时鲁汶大学物理系的 $2 \times 1.7 \text{ MV}$ 的串列加速器上进行的.实验条件如下:入射 He⁺ 的能量为 1.57 MeV,经过准直后束流垂直于靶面入射,束斑约为 $1.1 \text{ mm} \times 1.1 \text{ mm}$,Au-Si 面垒探测器位于与入射离子束成 167.8° 的方向上,即探测散射角为 167.8° 的粒子,能量分辨率为 15 keV,样品固定在可以三维转动的靶架上,转动精度为 0.01°,用作能量刻度的标准样品是在硅衬底上生长厚度约为 450 nm 的 Au-Fe-SiO₂ 薄膜.实验分别测量了 5 块样品 0001 轴的背散射随机谱和沟道谱,同时利用 RUMP 程序^[10]模拟 0001 轴的随机谱.对样品中各元素的结构变化以及扩散深度进行了精确定量分析.

3. 实验结果及分析

图 2 是经过 10 和 600 s 合金后样品的 RBS/沟道沿 0001 轴的随机谱和模拟谱,图中上方是 RBS 测量时探测束的几何关系示意图.图 2 中标有 Au 的箭头所指位置是 He⁺ 与样品中 Au 元素发生背散射后所对应的平均能量,Au 原子散射谱的半高宽 (FWHM) 表示镀 Au 电极在不同合金时间下扩散的深度.图 2 中的台阶是 Ga 元素的背散射信息,Ni 由于原子序数比 Ga 小,散射出的 He⁺ 的能量比 Ga 的小,所以其信号就叠加在 Ga 信号的台阶上.N 由于原子序数更小,散射出的 He⁺ 能量更低,所以其信号叠加在 Ga 台阶更低的能量位置上,但由于其散射截面很小,所以产额也低,因而 N 信号不是很明显.O 与 N 一样,也只有微弱的信号,借助 RUMP 模拟程序可知,在氧气氛中 10 s 合金时几乎没有 O 元素参与其中,而在 600 s 合金时已经有比较明显的 O 元素背散射峰.这表明在同一合金温度下,随着合金时间的延长,氧气会与 Ni/Au 电极形成新的结构.从图 2 可以发现,随着合金时间的延长,Ni/Au 电极的背散射峰高度明显降低,而 FWHM 显著增加,说明 Ni/Au 电极元素之间的相互扩散现象非常严重.通过 RUMP 程序模拟 5 块样品沿 0001 随机谱可知 Ni/Au 电极在相同合金温度不同合金时间下的扩散深度 (见表 1).

图 3 是氧气氛中 500 °C 不同合金时间的 Au(20 nm)/Ni(20 nm)/p-GaN 样品局部放大的 RBS/沟道沿 0001 轴的沟道谱.图 3(a) 显示了随着合金时间的延长 Au 逐渐向电极金属与半导体界面移动,仅合金 60 s 后 Au 向电极内部的扩散就已非常明显.接着,在 180 s 合金时间就使大部分 Au 扩散到了金属与半导体的界面,而随后的 300 和 600 s 合金时间只能使 Au 的信号非常缓慢地向低能方向扩散,Au 的背散射峰几乎没有变化.利用 RUMP 程序模拟得出的 Au 在不同合金时间下的扩散深度也验证了这一实验结果 (见表 1).图 3(b) 显示了随着合金时间的延长 Ni 逐渐向样品表面移动.在 10 s 合金后 Ni 就有向样品表面扩散趋势,甚至已有少量的 Ni 扩散到了电极的表面.接着,60 和 180 s 合金则使 Ni 向外的扩散更加显著.而更长的合金时间 (300 s) 则使 Ni 向外扩散基本达到饱和状态,进一步延长合金时间 (600 s) 给 Ni 信号带来的变化已很小.合金时间越

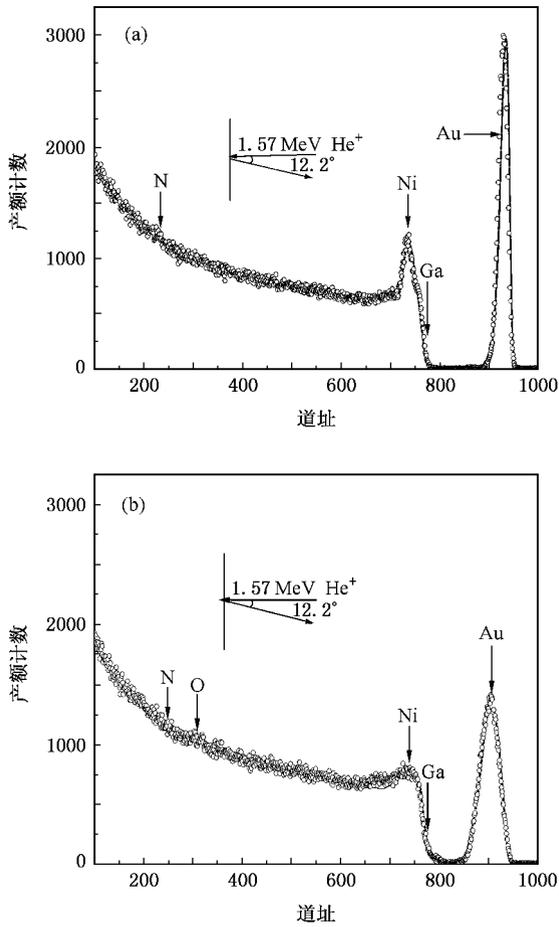


图 2 样品在氧气氛中 500 °C 合金 10 和 600 s 的 RBS/沟道沿 0001 轴的随机谱和模拟谱 (a)合金 10 s 的随机谱(圆圈)和随机谱的模拟谱(实线)(b)合金 600 s 的随机谱(圆圈)和随机谱的模拟谱(实线)

表 1 Ni/Au 电极在相同合金温度不同合金时间下的相互扩散深度

合金时间/s	10	60	180	300	600
Au 扩散深度/nm	18	46	93	97	102
Ni 扩散深度/nm	5	38	44	48	49

长,电极表面 Ni 相对于 Au 的含量就越高. Au 向电极内部和 Ni 向电极表面的扩散表明 500 °C 合金后 Ni/Au 双层电极中层反转效应已经发生^[11]. 实验发现,这一反应在 500 °C 下合金 300 s 后就已经进行得比较充分. 图 3(c)显示了随合金时间的延长样品中 O 信号的移动趋势. 由于原子序数小, O 的背散射产额很低,在随机谱中产额小的 O 信号只能叠加在产额高的 Ga 信号上就更加难以辨认. 但是在 RBS/沟道谱中,由于 Ga 信号的产额较低, O 信号就可以得到很好辨认. 利用沟道谱研究电极金属中 O 的扩散现象,为研究晶体材料电极中的轻元素提供了新的

思路. 从图 3(c)可以发现,在 10 和 60 s 合金后沟道谱中基本看不到 O 信号的存在,说明这么短的合金时间不足以使电极发生明显的氧化. 这也可以从图 3(a)的模拟结果中看到. 但是,样品在经过 180 s 合金之后,其沟道谱中 O 信号开始略有显现,随着合金时间进一步延长到 300, 600 s, O 元素不断地向样品内部扩散且逐渐增强,说明电极内部有越来越多

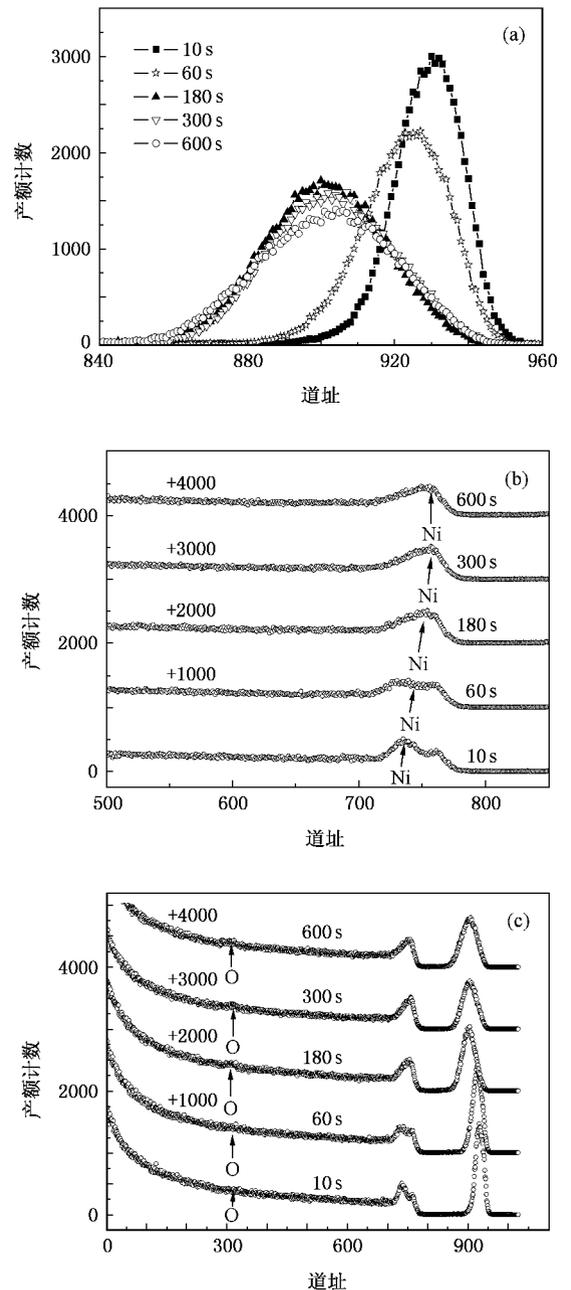


图 3 样品在氧气氛中 500 °C 不同合金时间的局部放大 RBS/沟道沿 0001 轴的沟道谱 (a)Au 信号 (b)Ni 信号 (c)O 信号. (b)和(c)图中谱线左上方的数值是再增加的产额计数,以便于观察 Ni 和 O 在样品内部的扩散趋势

的 Ni 被氧化.这也间接证明在合金时间 300 s 后, Ni 已经大量扩散到样品表面被氧化后形成 NiO,同时 Ni/Au 双层电极的层反转效应产生.

图 4 是氧气氛中 500 °C 合金时 Au(20 nm)/Ni(20 nm)/p-GaN 欧姆接触的比接触电阻 ρ_c 随合金时间的变化.从图 4 可以看出:在合金开始阶段比接触电阻迅速降低.合金 60s 后比接触电阻降低的速度减慢,在这个合金时间下 Au 已经扩散到了 p-GaN 表面,这有助于 ρ_c 的降低.因为只有这样, Au 才有可能在 p-GaN 上形成有利于 ρ_c 降低的外延结构,这时也有 NiO 在这一界面形成,这两种变化都有利于 ρ_c 的降低^[7,12,13].接着,更长的合金时间导致 Au 和 Ni 分别进一步向电极内部和电极表面扩散,说明 Ni/Au 双层电极的层反转效应的发生.当合金时间达到 600 s 时, Au 和 Ni 信号的扩散变得不明显,但 O 仍然继续向电极内部扩散(见图 3(c)).这表明合金 600 s 后,比接触电阻的进一步降低与 p-GaN 金属界面的 Ni 被进一步氧化有关.

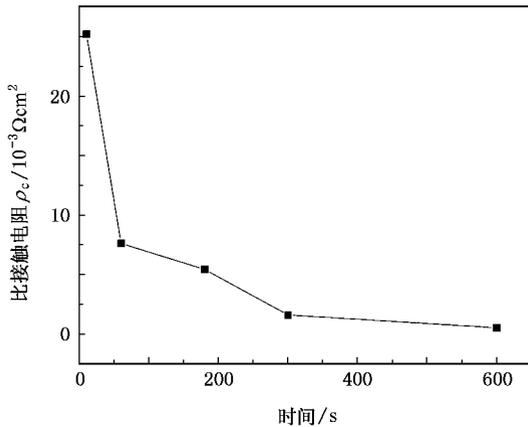


图 4 样品在氧气氛中 500 °C 合金的比接触电阻 ρ_c 随合金时间的变化

图 5 是氧气氛中 500 °C 合金时, Au(20 nm)/Ni(20 nm)/p-GaN 的电流-电压($I-V$)特性曲线随合金时间的变化. $I-V$ 曲线的线性越好,斜率越大,说明欧姆接触的特性越好.如图 5 所示:合金时间为 10 和 60 s 的样品 $I-V$ 曲线都不是直线,说明欧姆接触尚未形成.当合金时间延长到 180 s 时, $I-V$ 曲线开始变直,说明欧姆接触开始形成.当合金时间进一步延长到 300 s 时, $I-V$ 曲线的斜率达到最大值.当合金时间继续延长到 600 s 时, $I-V$ 曲线再次表现出非

线性,说明欧姆接触已被破坏.由此可知,氧化合金 Ni/Au 电极的欧姆接触特性在相同合金温度下受合金时间变化的影响很大,在 300 s 时形成的欧姆接触效果最佳,这与前面得到的实验结果一致.

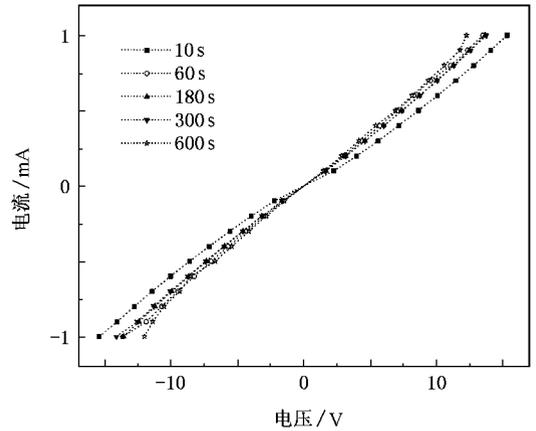


图 5 样品在氧气氛中 500 °C 合金的电流-电压特性曲线随合金时间的变化

4. 结 论

1) RBS/沟道技术是研究金属电极中相互扩散和微结构变化的有效实验手段,它能同时获得样品中各元素的含量、层厚以及元素扩散的信息.

2) 氧气氛中 p-GaN/Ni/Au 电极在同一合金温度(500 °C)下,随着合金时间的延长氧气会与 Ni/Au 电极中的 Ni 形成 NiO.同时, Ni/Au 电极的相互扩散现象非常严重, Au 向电极内部和 Ni 向电极表面的扩散表明合金后 Ni/Au 双层电极中在一定的合金时间下层反转效应已经发生.这两种结构变化都是形成欧姆接触的有效机制.

3) 氧气氛中 p-GaN/Ni/Au 电极在同一合金温度(500 °C)下,随着合金时间的延长比接触电阻持续降低.在合金时间 60 s 后降低的速度减慢, Au 扩散到 GaN 的表面,在 p-GaN 上形成外延结构, O 向电极内部扩散反应生成 NiO 对降低 ρ_c 起到了关键的作用.比接触电阻的降低对欧姆接触的改善是有益的.

4) 在相同合金温度(500 °C)不同合金时间系列实验中,氧气氛中的 p-GaN/Ni/Au 电极在合金时间为 300 s 时形成的欧姆接触效果最佳.

- [1] Ponce F A , Bour D P 1997 *Nature* **386** 351
- [2] Ding Z B , Yao S D , Wang K , Cheng K 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2977 (in Chinese) [丁志博、姚淑德、王 坤、程 凯 2006 物理学报 **55** 2977]
- [3] Kong Y C , Zheng Y D , Chu R M , Gu S L 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1756 (in Chinese) [孔月蝉、郑有 、 储荣明、顾书林 2003 物理学报 **52** 1756]
- [4] Xu G Z , Liang H , Bai Y Q , Liu J M , Zhu X 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5344 (in Chinese) [徐耿钊、梁 琥、白永强、刘纪美、朱 星 2005 物理学报 **54** 5344]
- [5] Chen L C , Ho J K , Chen F 1999 *Phys. Stat. Sol. A* **176** 773
- [6] Qiao D , Yu L S , Lau S S , Lin J Y , Jiang H X , Haynes T E 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 4196
- [7] Ho J K , Jong C S , Chiu C C 1999 *J. Appl. Phys.* **86** 4496
- [8] Nara Yan J , Wang H 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 3978
- [9] Berger H H 1972 *Sol. State Electron.* **15** 145
- [10] Doolittle L R 1985 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **9** 344
- [11] Qiao D , Yu L S , Lau S S 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 4196
- [12] Davydov A V , Bendersky L A , Boettinger W J 2004 *Appl. Surf. Sci.* **223** 24
- [13] Narayan J , Wang H , Oh T H , Choi H K , Fan J C C 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 3978

Investigation on the formation mechanism and diffusion of the electrode metal of oxidized Au/Ni/p-GaN ohmic contact in different alloying time^{*}

Ding Zhi-Bo Wang Kun Chen Tian-Xiang Chen Di Yao Shu-De[†]

(School of Physics , Peking University , Beijing 100871 , China)

(Received 27 July 2007 ; revised manuscript received 1 September 2007)

Abstract

Using Rutherford backscattering (RBS) channeling method , we investigated the microstructure evolution in oxidizing atmosphere of Ni/Au contact on p-GaN during annealing at constant temperature (500 °C) but for different alloying time . The technique of RBS/channeling and simulation of RUMP program were used to investigate the diffusion of the electrode metal . It was found that Ni diffused to the interior of the sample , Au diffused to the surface of p-GaN after 60 s alloying time and the epitaxial structures of Au also began to form on p-GaN at the same time . The O also diffused into the sample after 180 s alloying time . Considering a continuous decrease in the ρ_c , it is suggested that the epitaxial structures of Au on p-GaN and the formation of NiO play a critical role in forming low resistance ohmic contact to p-GaN . At 300 s alloying time at the same annealing temperature (500 °C) , the epitaxial structure of Au was improved further and the O also diffused deeper into the sample , and the ohmic contact reached the optimal value .

Keywords : GaN , Rutherford backscattering/channeling , ohmic contact

PACC : 7280E , 4180G , 7340L

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10575007).

[†] Corresponding author. E-mail : sdyao@pku.edu.cn