

文章编号: 1000-7032(2016)02-0219-05

多层 Ti/Al 电极结构对 GaN/AlGaN HEMT 欧姆接触特性的影响

于 宁¹, 王红航², 刘飞飞¹, 杜志娟¹, 王岳华¹, 宋会会¹, 朱彦旭^{1*}, 孙 捷¹

(1. 北京工业大学电控学院 光电子技术实验室, 北京 100124;

2. 电子科技大学中山学院 电子薄膜与集成器件国家重点实验室中山分实验室, 广东 中山 528402)

摘要: 研究了多层 Ti/Al 结构电极对 GaN/AlGaN HEMT 欧姆接触特性及表面形态的影响。采用传输线模型对各结构电极的比接触电阻率进行了测量, 采用扫描电子显微镜对电极表面形态进行扫描。实验结果显示, 在同样的退火条件下, 随着 Ti/Al 层数的增加, 比接触电阻率逐渐减小, 表面形态趋于光滑; 降低 Ti/Al 层的厚度会加剧 Au 向内扩散而增加比接触电阻率, 但能稍微改善表面形态; Ti 比例过高会影响 TiN 的形成导致比接触电阻率增加, 但能明显改善表面形态。

关 键 词: 高电子迁移率晶体管; 欧姆接触; 退火; 比接触电阻率

中图分类号: TN386.3 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20163702.0219

Effect of Multilayer Ti/Al Electrode Structure on AlGaN/GaN HEMT Ohmic Contact Characteristics

YU Ning¹, WANG Hong-hang², LIU Fei-fei¹, DU Zhi-juan¹, WANG Yue-hua¹,
SONG Hui-hui¹, ZHU Yan-xu^{1*}, SUN Jie¹

(1. Beijing Optoelectronic Technology Laboratory, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, Zhongshan Institute,
University of Electronic Science and Technology of China, Zhongshan 528402, China)

* Corresponding Author, E-mail: zhuyx@bjut.edu.cn

Abstract: The effect of multilayer Ti/Al structure electrode on AlGaN/GaN HEMT Ohmic contact characteristics and the surface morphology were investigated. The specific contact resistance of all kinds of electrode structure was measured by transmission line model (TLM). The scanning electron microscope (SEM) was used to measure the electrode surface morphology. The experiment results show that the special contact resistance tend to decrease and the surface morphology tend to be smooth with the increasing of the number of Ti/Al layers in the same annealing conditions. The reducing of the thickness of Ti/Al layer can increase the specific contact resistance because of Au in-diffusion, but can slightly improve the surface morphology. High Ti ratio can reduce the formation of TiN, and lead to the increasing of specific contact resistance, but can greatly improve the surface morphology.

Key words: high electron mobility transistor; Ohmic contact; annealing; specific contact resistance

收稿日期: 2015-10-26; 修订日期: 2015-11-14

基金项目: 北京市15青年拔尖项目(311000543115501); 中山市科技计划(2014A2FC305); 国家自然科学基金(61204011); 科研基地建设(PXM2015_014204_500008)资助项目

1 引 言

第三代半导体材料 GaN 由于具有禁带宽、击穿电场强、电子饱和速度高等特点,广泛应用于高频、高功率、高温器件和蓝紫光 LED 等领域^[1]。GaN 基 GaN/AlGaIn 高电子迁移率晶体管 (HEMT) 具有高电子浓度和高电子迁移率等特性,已经成为目前高频功率器件和功率开关器件等领域的研究热点^[2-3]。

良好的欧姆接触是制作高性能 GaN/AlGaIn HEMT 器件的重要因素之一,包括低的欧姆接触电阻和较好的表面形貌。目前实现 GaN/AlGaIn HEMT 欧姆接触的方法通常是使用 Ti/Al 基础上的多层金属结构,如 Ti/Al/Ni/Au、Ti/Al/Ti/Au、Ti/Al/Pt/Au、Ti/Al/Pt/Cu 等^[4-7]。在氮气氛围下,通过在 800 °C 及以上温度退火,Ti 离子向半导体方向扩散,在金属与 GaN 界面处形成低功函数的 TiN,降低了金属与 GaN 之间的有效势垒高度;同时,在半导体界面处形成了 n 型重掺杂^[8],减薄了势垒层厚度。电子通过隧穿效应通过势垒,从而实现良好的欧姆接触^[9]。

本文设计了 5 种金属层结构的欧姆接触电极,使用不同的层数、厚度和金属之间的比例,采用传输线测试 (Transmission line method, TLM) 方法测量了 5 种电极的比接触电阻率,同时对各电极表面进行了扫描电子显微镜 (SEM) 扫描获得图片信息。通过对比,得出 Ti/Al 金属层参数对欧姆接触电阻及表面形态的影响。

2 理论与实验

实验采用的 GaN/AlGaIn 外延片示意图如图 1 所示。采用金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 方法在 (111) 晶面硅衬底上依次淀积 3 758 nm 的缓冲层、231 nm 的本征 GaN 层、22.4 nm 的 AlGaIn 势垒层、2.2 nm 的 GaN 盖帽层。欧姆接触电极包括 Ti/Al/Ni/Au 4 种金属,Ti 作为势垒层金属,能形成低功函数,薄的势垒层;Al 作为覆盖层金属,增强 N 原子与 Ti 原子的固相反应;Ni 作为扩散阻挡层金属,阻止各层互相扩散;Au 作为帽层金属^[10]。

欧姆接触实验样品的制备首先通过采用电感耦合等离子体 (ICP) 刻蚀的方法隔离出有源区,刻蚀时间为 2 min,刻蚀深度为 700 μm 。然后,使用等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 方法在样

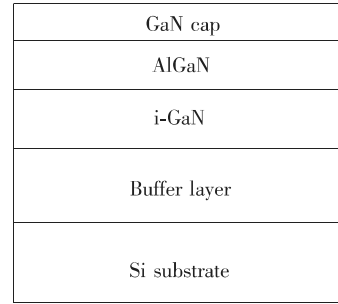


图 1 外延结构示意图

Fig. 1 Extensional structure diagram

品表面淀积 300 nm 的 SiO_2 保护台面并在氢氟酸、氟化铵腐蚀液中腐蚀出有源区。利用光刻的方法在有源区上制作传输线测试 (TLM) 所需图形,溅射 5 种结构欧姆接触电极,样品 1 为 Ti/Al/Ni/Au (150 nm/1 500 nm/400 nm/500 nm),样品 2 为 Ti/Al/Ti/Al/Ni/Au (50 nm/500 nm/50 nm/500 nm/400 nm/500 nm),样品 3 为 Ti/Al/Ti/Al/Ni/Au (75 nm/750 nm/75 nm/750 nm/400 nm/500 nm),样品 4 为 Ti/Al/Ti/Al/Ni/Au (150 nm/650 nm/150 nm/700 nm/400 nm/500 nm),样品 5 为 Ti/Al/Ti/Al/Ti/AlNi/Au (50 nm/500 nm/50 nm/500 nm/50 nm/500 nm/400 nm/500 nm),剥离光刻胶后形成 TLM 接触图形。在氮气氛围下对样品进行退火,退火温度为 800 °C,退火时间为 90 s。图 2 为样品示意图,TLM 测试电极边长 W 为 70 μm ,相邻两电极间距 d 分别为 5, 10, 20, 30, 45 μm 。

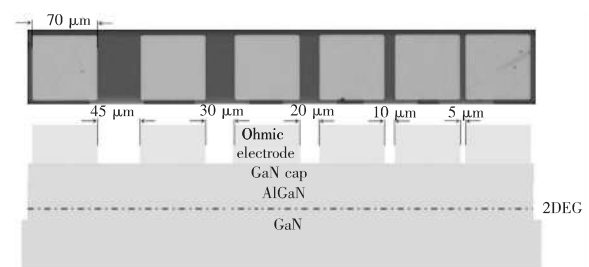


图 2 TLM 测试电极图像及截面图

Fig. 2 Image and cross section diagram of TLM test electrode

传输线测试是在通过电流恒定的情况下,通过测量各接触点之间的电压求出各自电阻,再按照相应的方法进行数据拟合计算和处理,最后求得比接触电阻率^[11]。在矩形有源区区域制作若干个间距不等的方块,如图 3 所示,边长为 W (70 μm),依次在间隔 d 不同 (5, 10, 20, 30, 45 μm) 的方块之间加恒定电流,并测出两端电压值,即可求得两电极间

的总电阻 R_d :

$$R_d = \frac{R_s}{W} d_n + 2R_c, \quad (1)$$

其中 R_c 为欧姆接触电阻, R_s 为方块电阻。所得数据拟合到如图所示的坐标轴中, 获得 R_s 和 R_c , 将其带入如下表达式:

$$\rho_c = \frac{R_c^2 W^2}{R_s}, \quad (2)$$

得到比接触电阻率 ρ_c 。

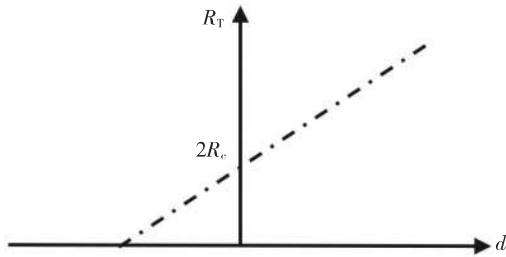


图3 TLM 传输线模型测量曲线
Fig. 3 Measuring curve of TLM model

3 结果与讨论

在退火的过程中, 电极各金属层中的反应主要包括以下几种: Ti 向内扩散在半导体层界面处形成低功函数、薄厚度的 TiN 层, 降低接触电阻率, 这对形成良好的欧姆接触有着至关重要的作用; Ti 与 Al 反应形成较低电阻率和较低功函数的 Ti-Al 合金, 有利于欧姆接触形成; Al 扩散到金半接触边界形成宽禁带 AlN, 增加接触电阻率; Au 向内扩散至金半接触界面, 提高了功函数, 不利于欧姆接触形成; Au 与 Ti/Al 反应形成 Ti-Au-Al 合金, 减少 Au 向内扩散; Al 向外扩散到 Au 表面, 破坏欧姆电极表面形态。

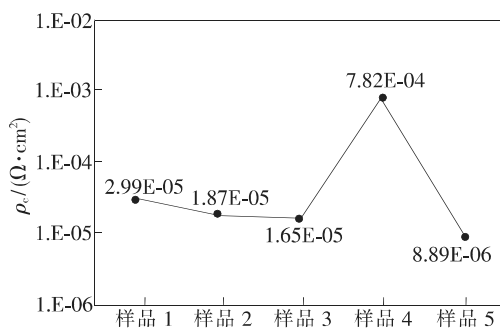


图4 5种样品的比接触电阻率
Fig. 4 Specific contact resistance of the five samples

通过 TLM 测试, 图 4 汇总了 5 种样品的比接触电阻率。为了比较不同 Ti/Al 层数对欧姆接触特性的影响, 实验设计了样品 1、样品 3 及样品 5, 3 种样品欧姆接触电极厚度相同, 为 2 550 nm, 各金属比例相同, Ti:Al = 1:10; 不同之处在于 3 种样本的 Ti/Al 层数不同, 分别为 1、2、3 层。从图 4 可以看出, 随着层数的增加, 比接触电阻率逐渐减小, 3 层 Ti/Al 有着最小的欧姆接触电阻率。在单层 Ti/Al 结构中, 较厚的 Al 层不能与 Ti 层充分反应, 多余的 Al 向内扩散在金半界面形成 AlN, AlN 为宽禁带材料, 增加了接触电阻率; 同时, Al 向内扩散也会影响 TiN 的形成, 通过在厚的 Al 层中插入 Ti 层组成多 Ti/Al 层结构, 可以增加 Ti 与 Al 直接的反应, 随着层数的增加, 反应愈加充分, 有效地阻止了 Al 向内扩散, 降低了接触电阻率。

样品 2、样品 3 与样品 4 的 Ti/Al 层数相同, 都为 2 层。样品 2 与样品 3 的 Ti/Al 比例相同, 但样品 2 厚度较薄; 样品 4 与样品 3 厚度相同, 但样品 4 的 Ti 比例更高。从图 4 可以看出, 样品 2 的电阻率略高于样品 3, 这是由于 Ti/Al 层厚度的减小使得 Au 向内金半接触界面扩散程度加重, 提高了界面处功函数; 样品 3 的 Ti/Al 层较厚, 能充分与 Au 反应形成 Ti-Au-Al 合金, 有效阻止其向内扩散。样品 4 的欧姆接触特性较差, 可能是由于 Al 比例较小而不能很好地催化 TiN 的形成。

图 5 为样品 1、样品 3 及样品 5 的欧姆电极表面的 SEM 图片及台阶仪扫描图, SEM 图像中内嵌光学显微镜图片。可以看出, 随着 Ti/Al 层数的增加, 表面形态更加光滑。单层 Ti/Al 结构由于 Ti 和 Al 之间反应不够充分, Ti 向 Au 层扩散严重, 高温下 Ti 涌出 Au 表面形成凸起, 使表面更为粗糙。

图 6 为样品 2 和样品 4 的欧姆电极表面的 SEM 图片及台阶仪扫描图, SEM 图像中内嵌光学显微镜图片。样品 2 的表面形态略优于样品 3, 这是由于 Al 层的减薄使得扩散至 Au 层表面的 Al 减少; 虽然样品 4 的比接触电阻率增加很多, 但表面形态要远好于样品 3, 这是由于 Ti 含量的增加及 Al 含量的减少使得 Ti-Al 合金增多, 未反应的 Al 减少, 从而抑制了 Al 向外扩散。

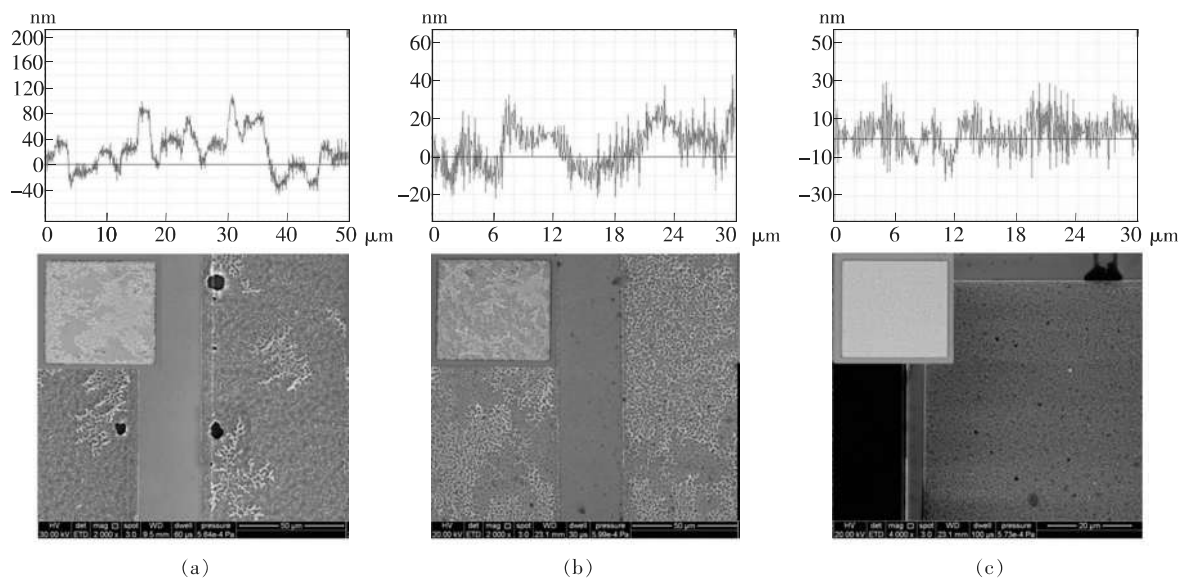


图 5 样品 1(a)、样品 3(b)及样品 5(c)的台阶仪数据(上)与 SEM 图形(下),内嵌图像为光学显微镜图像。

Fig. 5 Step profiler data (top) and SEM graphics (below) of sample 1 (a), sample 3 (b), and sample 5 (c). Embedded images are optical microscope images.

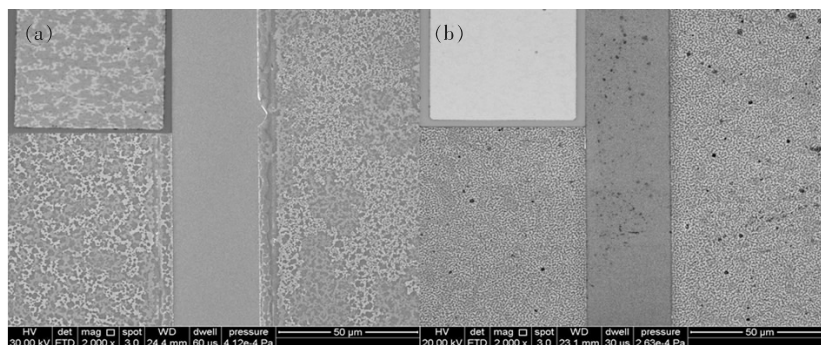


图 6 样品 2(a)、样品 4(b)的 SEM 图形,内嵌图像为光学显微镜图像。

Fig. 6 SEM graphics of sample 2 (a) and sample 4 (b). Embedded images are optical microscope images.

4 结 论

在 Si 基 HEMT 外延片上,通过对基于多层 Ti/Al 结构的欧姆电极与传统的 Ti/Al/Ni/Au 欧姆电极的对比,发现在 Ti: Al 比例为 1: 10、电极金属层总厚度不变的情况下,通过在 Al 层中插入 Ti 层形成的多层 Ti/Al 结构,使得 Ti 与 Al 之间的反应更加充分,实现了更小的比接触电阻率和更好的表面形态,而且,欧姆特性随着 Ti/Al 层数的增

加而改善,实验中 Ti/Al/Ti/Al/Ti/Al/Ni/Au 结构有着最好的欧姆特性。Ti/Al 层的厚度不应太薄,虽然可以稍微改善表面形态,但是由于太薄会导致 Au 向内扩散,TiN 的形成受到影响,比接触电阻率也有所增大;Ti 层所占的比例也不应太大,Al 含量过小会影响 TiN 的形成,但是表面形态却会得到很大的改善。下一步的工作将对 Ti/Al 之间的比例进行实验,使表面形态和欧姆接触特性达到最佳。

参 考 文 献:

- [1] 辛晓龙,左然,童玉珍,等. MOVPE 生长 GaN 的表面反应机理 [J]. 发光学报, 2015, 36(7):744-750.
XIN X L, ZUO R, TONG Y Z, *et al.*. Surface reaction mechanism on GaN MOVPE growth [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(7):744-750. (in Chinese)
- [2] SHINOHARA K, REGAN D C, TANG Y, *et al.*. Scaling of GaN HEMTs and schottky diodes for submillimeter-wave

- MMIC applications [J]. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, 2013, 60(10):2982-2996.
- [3] TANG Y, SHINOHARA K, REGAN D, *et al.*. Ultrahigh-speed GaN high-electron-mobility transistors with fT/f_{max} of 454/444 GHz [J]. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, 2015, 36(6):549-551.
- [4] BRIGHT A N, THOMAS P J, WEYLAND M, *et al.*. Correlation of contact resistance with microstructure for Au/Ni/Al/Ti/AlGaIn/GaN ohmic contacts using transmission electron microscopy [J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, 89(6):3143-3150.
- [5] BARDWELL J A, SPROULE G I, LIU Y, *et al.*. Comparison of two different Ti/Al/Ti/Au ohmic metallization schemes for AlGaIn/GaN [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2002, 20(4):1444-1447.
- [6] LEE C T, KAO H W. Long-term thermal stability of Ti/Al/Pt/Au Ohmic contacts to n-type GaN [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, 76(17):2364-2366.
- [7] WONG Y Y, CHEN Y K, MAA J S, *et al.*. Low resistance copper-based Ohmic contact for AlGaIn/GaN high electron mobility transistors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 103(15):152104.
- [8] WANG L, MOHAMMED F M, ADESIDA I. Formation mechanism of ohmic contacts on AlGaIn/GaN heterostructure: electrical and microstructural characterizations [J]. *J. Appl. Phys.*, 2008, 103(9):093516.
- [9] FONTSERÈ A, PÉREZ-TOMÁS A, PLACIDI M, *et al.*. Micro and nano analysis of 0.2 Ω mm Ti/Al/Ni/Au Ohmic contact to AlGaIn/GaN [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 99(21):213504.
- [10] 裴凤丽,冯震,陈炳若. AlGaIn/GaN HEMT 欧姆接触的研究进展 [J]. *半导体技术*, 2007, 32(1):6-11.
PEI F L, FENG Z, CHEN B R. Investigation on the Ohmic contacts in AlGaIn/GaN HEMTs [J]. *Semicond. Technol.*, 2007, 32(1):6-11. (in Chinese)
- [11] 王磊. AlGaIn/GaN 肖特基势垒二极管制作工艺与器件特性研究 [D]. 北京:清华大学, 2011.
WANG L. *Studies on Fabrication and Characteristics of AlGaIn/GaN Schottky Barrier Diodes* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011. (in Chinese)



于宁(1990 -)男,山东烟台人,硕士研究生,2013年于常州大学获得学士学位,主要从事 GaN HEMT 器件及探测器的研究。
E-mail: yuning@emails.bjut.edu.cn



朱彦旭(1977 -)男,河北秦皇岛人,博士,副教授,2007年于北京工业大学获得博士学位,主要从事 GaN HEMT 器件、半导体发光二极管、激光器、太阳能电池等半导体器件的研究。
E-mail: zhuyx@bjut.edu.cn