第 27 卷　第 10 期
2006 年 10 月

半　导　体　学　报
CHINESE JOURNAL OF SEMICONDUCTORS

Vol.27　No.10
Oct.,2006

AlGaN/GaN 异质结构的欧姆接触*

杨　燕†　王文博　郝　跃

（西安电子科技大学微电子学院，宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室，西安　710071）

摘要： 通过改变 Ti/Al 的结构及退火条件，研究了 AlGaN/GaN 异质结构上 Ti/Al/Ni/Au 金属体系所形成的欧姆接触.结果表明，Ti/Al/Ni/Au 金属厚度分别为 20，120，55 和 45nm，退火条件为高纯 N_2 气氛中 850℃、30s 时在 AlGaN/GaN 异质结构上获得了良好的欧姆接触，其比接触电阻率为 $3.30\times10^{-6}\Omega\cdot cm^2$.SEM 分析表明该条件下的欧姆接触具有良好的表面形貌，可以很好地满足高性能 AlGaN/GaN 高电子迁移率晶体管制造的要求.

关键词： AlGaN/GaN；Ti/Al/Ni/Au；欧姆接触；高电子迁移率晶体管
EEACC： 2520D；2550
中图分类号： TN305.99　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 0253-4177(2006)10-1823-05

1　引言

半导体 GaN 具有禁带宽度大、击穿场强高、热导率大、电子饱和漂移速度高等特点，在高温以及微波大功率器件制造领域中具有极大的潜力[1,2].其中，AlGaN/GaN 高电子迁移率晶体管在微波大功率和高温应用方面具有明显的优势，已经成为当前研究的热点之一.为了进一步提高 AlGaN/GaN HEMTs 的器件性能，有必要对其相关的制造工艺进行研究和优化.

欧姆接触作为器件制备的关键工艺，决定着器件的许多主要参数（如电流密度、外部增益、最高工作温度和大功率性能等），要制备高性能的 AlGaN/GaN HEMTs，形成良好的金属与 AlGaN 的欧姆接触是十分重要的.Ti/Al 是最常用的欧姆接触结构，经过退火，Ti 与 AlGaN 中的 N 反应生成 TiN，同时使 AlGaN 中产生了大量起施主作用的 N 空位，形成 n^+ 层，从而使电子易于隧穿，形成欧姆接触[3].Al 能防止 AlGaN 中 Ga 的外扩散所导致的施主浓度降低，但 Ti 和 Al 均容易被氧化而形成高阻氧化层，反而使接触电阻有所增大.通常在 Ti/Al 之上再覆盖一层 Au 加以保护，但 Au 和 Al 很容易发生互扩散到达 AlGaN 表面，不利于形成良好的欧姆接触.在 Al 和 Au 之间加入 Ni 作为隔离，可以防止 Au 向 AlGaN 表面的扩散.Ti，Cr，Pt，Pd，Mo 等金属都可以作为隔离层，而 Ti/Al/Ni/Au 是目前 GaN 基材料欧姆接触常用的金属体系.

本文采用 Ti/Al/Ni/Au 金属体系与 AlGaN/GaN 异质结构形成欧姆接触，保持 Ni/Au 覆盖层厚度不变，研究了 Ti/Al/Ni/Au 金属体系中不同 Ti/Al 结构以及退火条件对欧姆接触的影响.

2　实验

实验所采用的 AlGaN/GaN 异质结材料是利用金属有机化学气相淀积（MOCVD）方法制备的，衬底为（0001）面单面抛光蓝宝石.首先在 520 ℃下生长厚度约为 30nm 的 GaN 成核层，接着在高温下依次生长厚度约为 1μm 的 GaN 缓冲层、8nm 厚的未掺杂 AlGaN 层和 16nm 厚的 Si 掺杂 AlGaN 层，其中 Si 掺杂浓度为 $1.0\times10^{18}\sim2.0\times10^{18}cm^{-3}$.测量得到的 AlGaN 层的 Al 组分为 27%，Hall 效应测量显示室温下该材料的电子迁移率为 $946cm^2/(V\cdot s)$，电子面密度为 $1.3\times10^{13}cm^{-2}$.

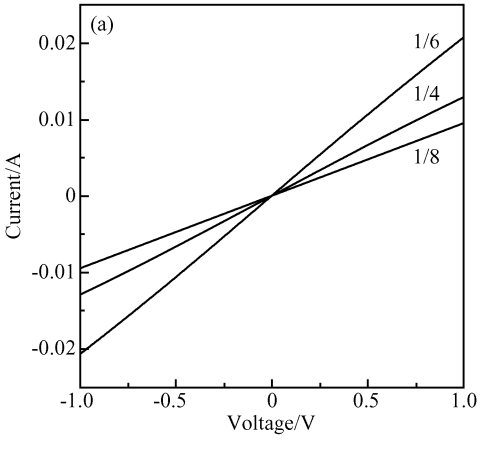
AlGaN/GaN 异质结材料样片经过清洗，用高纯 N_2 吹干，在表面先利用电子束蒸发淀积一层 150nm 厚的 SiO_2，通过 ICP 刻蚀获得台面后采用标准光刻工艺定义传输线模型（TLM），再利用电子束蒸发淀积 Ti/Al/Ni/Au 四层金属，经剥离获得测试图形.每组 TLM 图形中包含 8 个面积为 90μm×90μm 的电极，对应的间距分别为 5，7，9，11，13，15 和 20μm.剥离后的样品在高纯 N_2 气氛下退火.利用 Agilent 4156C 半导体参数分析仪测试样品的 *I-V* 特性，测试中采用四探针法以消除探针与样品之间的接触电阻和接触电势带来的影响.

* 国防科技预研（批准号：41308060106）和国防科技重点实验室基金（批准号：51433040105DZ0102）资助项目
† 通信作者.Email：billy123456@163.com
2006-03-27 收到，2006-05-04 定稿
©2006 中国电子学会

3 结果与讨论

根据欧姆接触形成的机理，在 Ti/Al/Ni/Au 金属体系中，由于 Ti/Al 直接与半导体接触，因此强烈地影响欧姆接触的形成. 通过改变 Ti/Al 结构和退火条件，金属之间以及金属与半导体之间的反应生成不同的产物，得到不同的金属/半导体界面，形成了不同的欧姆接触[4].

本文首先研究了 Ti/Al/Ni/Au 金属体系中，Ti/Al 厚度比例对欧姆接触的影响. 采用厚度分别为 30，55 和 45nm 的 Ti，Ni 和 Au，通过改变 Al 的厚度以获得不同厚度比例的 Ti/Al. 采用常规退火条件，即高纯 N_2 气氛中 850℃、30s. 图 1 显示了 Ti/Al 厚度比例对欧姆接触的影响：图 1(a)为电极间距为 5μm 时样品的 *I-V* 特性；图 1(b)为样品比接触电阻率 ρ_C 的变化. 图 1(a)表明在退火条件为 850℃、30s 下，不同 Ti/Al 厚度比例的金属体系结构都可形成欧姆接触. 从图 1(b)中可以看到，Ti/Al 厚度比为 1/6 时欧姆接触 ρ_C 最小，为 $1.91\times10^{-5}\Omega\cdot cm^2$. Ti/Al/Ni/Au 金属体系与半导体形成欧姆接触时，金属间的反应比金属与半导体之间的反应更容易进行，Ti/Al 经过退火首先形成 $TiAl_3$，随后形成其他 Ti，Al 间的合金[4~6]. 这些 Ti，Al 间的合金功函数较低，易于形成低电阻接触，并能阻止 Au 扩散至 AlGaN 表面[7]. 剩余的 Ti 存在于金属/半导体界面，继续与 AlGaN 中的 N 反应形成 TiN，使 AlGaN 中产生大量的 N 空位. 在 Ti/Al/Ni/Au 金属体系中，Ti/Al 厚度比例存在一个最优值.



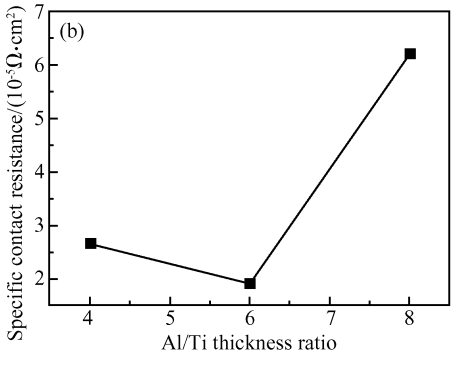
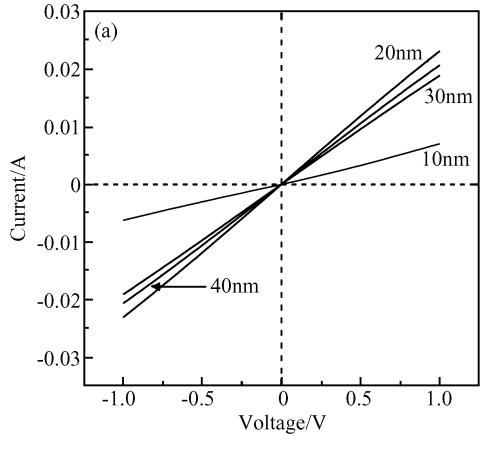


图 1 Ti/Al 厚度比例对欧姆接触的影响 (a) *I-V* 特性；(b) ρ_C 的变化

Fig. 1 Effects of different Ti/Al thickness ratios on ohmic contact (a) *I-V* characteristics; (b) ρ_C variation

在确定了 Ti/Al 厚度比例后，继续分析 Ti 和 Al 的厚度变化对欧姆接触的影响. 依照 1/6 的 Ti/Al 厚度比例，分别采用 10，20，30 和 40nm 厚的 Ti，获得了不同厚度的 Ti/Al，Ni 和 Au 的厚度仍分别为 55 和 45nm，高纯 N_2 气氛中对样品进行 850℃、30s 的退火. 图 2 显示了 Ti 厚度对欧姆接触的影响：图 2(a)为电极间距为 5μm 时样品的 *I-V* 特性；图 2(b)为样品比接触电阻率 ρ_C 的变化. 可以看出，Ti/



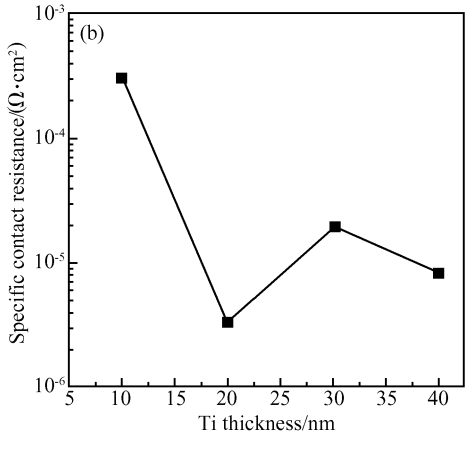


图 2 Ti/Al 中 Ti 的厚度对欧姆接触的影响 (a) *I-V* 特性；(b) ρ_C 的变化

Fig. 2 Effects of different Ti thicknesses on ohmic contact (a) *I-V* characteristics; (b) ρ_C variation

Al 厚度为 10nm/60nm，30nm/180nm 和 40nm/240nm 样品的比接触电阻率 ρ_C 分别为 3.07×10^{-4}，1.90×10^{-5} 和 $8.40\times10^{-6}\Omega\cdot cm^2$. Ti/Al 厚度为 20nm/120nm 时，所获得的比接触电阻率最小，通过 TLM 测量计算得到 ρ_C 为 $3.30\times10^{-6}\Omega\cdot cm^2$. 图 3 是 Ti/Al/Ni/Au 厚度为 20nm/120nm/55nm/45nm 条件下 TLM 图形中相邻两金属电极之间的总电阻 R 与对应间距 L 的函数关系.

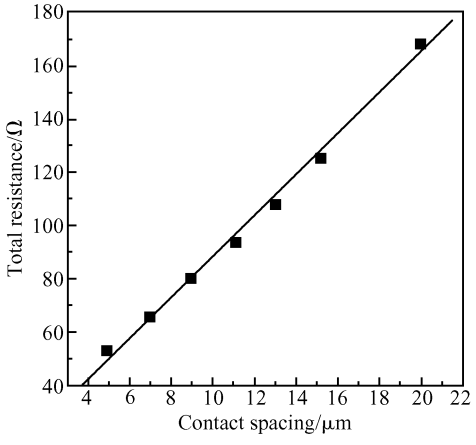


图 3　850℃退火 30s 后相邻两金属电极之间的总电阻与对应间距的函数关系

Fig. 3　Plot of total resistance as a function of the contact spacing after 30s annealing at 850℃

采用上述所获得的 Ti(20nm)/Al(120nm)/Ni(55nm)/Au(45nm)金属体系与 AlGaN/GaN 异质结构样品形成接触，研究在高纯 N_2 气氛中分别做 650，750，800，825，850℃，30s 的退火条件下的欧姆接触. 图 4 是电极间距为 5μm，退火前及不同温度下退火后样品的 *I-V* 特性. 退火前和 650℃退火后欧姆接触尚未形成，均呈现出整流特性. 750℃退火后，*I-V* 特性曲线已经呈现出良好线形，欧姆接触已经形成，此时 Ti 与 AlGaN 中的 N 反应生成 TiN，使 AlGaN 中产生了大量起施主作用的 N 空位，形成 n^+ 层，从而使电子易于隧穿，降低了接触电阻. 退火温度越高，AlGaN 中 N 空位的浓度越大，接触电阻就越低. 850℃退火 30s 后，样品的 *I-V* 特性曲线呈现出最大的斜率. 通过 TLM 测试计算得出 825℃退火 30s 后欧姆接触 ρ_C 为 $6.90\times10^{-6}\Omega\cdot cm^2$，退火温度为 750 和 800℃时的 ρ_C 分别为 1.70×10^{-5} 和 $1.16\times10^{-5}\Omega\cdot cm^2$. 可以看出，随着退火温度的提高，比接触电阻明显下降. 对样品在 850℃再次进行 30s 退火，*I-V* 测试得到了与之前相同的结果，说明高温没有对已形成的欧姆接触造成不可恢复的破坏，得到的欧姆接触具有较好的热稳定性.

图 5 给出了 750，800 和 850℃退火后接触表面放大 500 倍的显微照片. 不同退火温度退火后均获

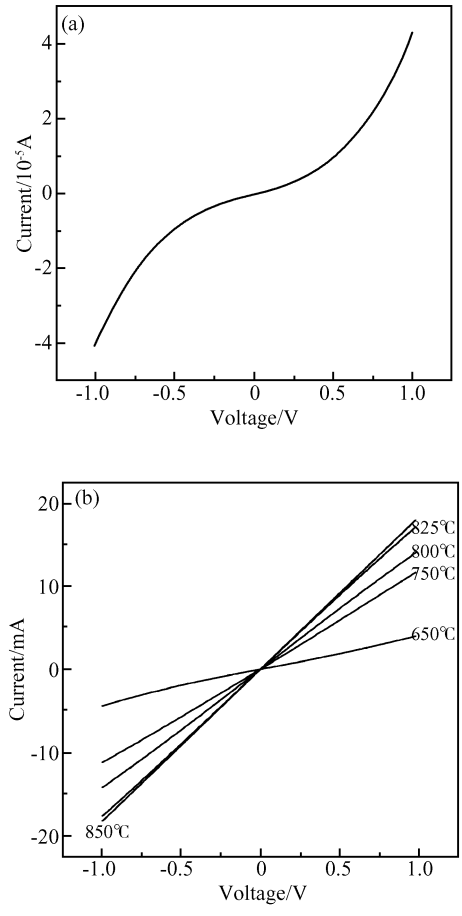


图 4　电极间距为 5μm 时样品的 *I-V* 特性　(a)退火前；(b)不同温度退火后

Fig. 4　*I-V* characteristics of the contacts at the contact distance of 5μm　(a) Before annealing; (b) After annealing at various temperatures

得了较为平整和光滑的表面，同时 TLM 图形轮廓清晰，不存在侧流现象.

图 6 是 750，800 和 850℃退火后接触表面 5000 倍的显微照片. 可以观察到经过不同温度的退火，接触表面的形态存在很大的差异. 750℃退火后的样品表面仍然比较平整，而 800℃退火后的样品表面则发生了较为明显的球聚现象. 850℃退火后的样品较 750℃退火后的样品获得了更为平整的表面，且具有更低的比接触电阻. 这可能是因为退火温度为 850℃时，合金之间发生更充分的反应，使得反应过后没有过剩的金属 Al，从而可获得相对更为平整的表面以及更低的比接触电阻. 综上分析表明在高纯 N_2 中 850℃、30s 的退火确实有助于获得良好的欧姆接触.

4　结论

本文研究了 Ti/Al/Ni/Au 金属体系与 Al-

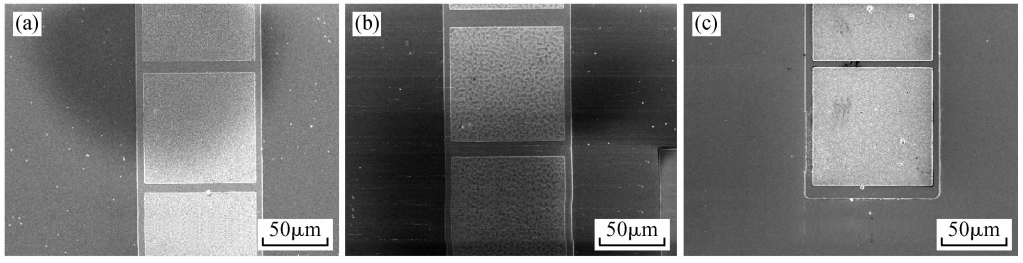


图 5 Ti/Al/Ni/Au 在高纯 N_2 气氛中在不同温度下退火 30s 后表面的 500 倍 SEM 照片 (a) 750℃;(b) 800℃;(c) 850℃

Fig.5 Surface images of 500× SEM of Ti/Al/Ni/Au metallization at different temperatures for 30s in ultra high purity N_2 ambient (a) 750℃;(b) 800℃;(c) 850℃

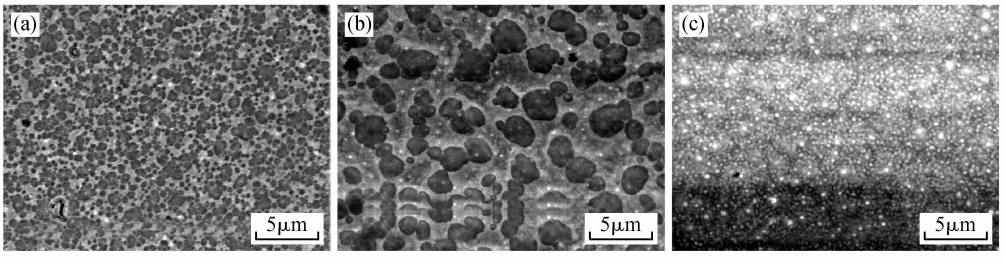


图 6 Ti/Al/Ni/Au 在高纯 N_2 气氛中在不同温度下退火 30s 后表面的 5000 倍 SEM 照片 (a) 750℃;(b) 800℃;(c) 850℃

Fig.6 Surface images of 5000× SEM of Ti/Al/Ni/Au metallization at different temperatures for 30s in ultra high purity N_2 ambient (a) 750℃;(b) 800℃;(c) 850℃

GaN/GaN 异质结构所形成的欧姆接触中不同 Ti/Al 结构以及不同温度的退火对欧姆接触的影响.采用 Ti(20nm)/Al(120nm)/Ni(55nm)/Au(45nm)金属体系,在高纯 N_2 气氛中,经过 850℃、30s 的退火,得到的欧姆接触 ρ_C 为 $3.30\times10^{-6}\Omega\cdot cm^2$,具有良好的热稳定性.通过 SEM 分析表明所得到的欧姆接触具有良好表面形态,而且未发现球聚和侧流等现象,能够很好地满足高性能 AlGaN/GaN HEMTs 制造的要求.

参考文献

[1] Fay M W, Moldovan G, Brown P D, et al. Structural and electrical characterization of AuTiAlTi/AlGaN/GaN ohmic contacts. J Appl Phys, 2002, 92(1): 94

[2] Koyama Y, Hashizume T, Hasegawa H, et al. Formation processes and properties of Schottky and ohmic contacts on n-type GaN for field effect transistor applications. Solid-State Electron, 1999, 43(8): 1483

[3] Liu Q Z, Lau S S. Review of the metal-GaN contact technology. Solid-State Electron, 1998, 42(5): 677

[4] Pelto C M, Chuang Y A, Chen Y, et al. Issues concerning the preparation of ohmic contacts to n-GaN. Solid-State Electron, 2001, 45(9): 1597

[5] Ruvimov S, Liliental-Weber Z, Washburn J, et al. Microstructure of Ti/Al and Ti/Al/Ni/Au ohmic contacts for n-GaN. Appl Phys Lett, 1996, 69(11): 1556

[6] Luther B P, Delaun J M, Mohney S E, et al. Analysis of a thin AlN interfacial layer in Ti/Al and Pd/Al ohmic contacts to n-type GaN. Appl Phys Lett, 1997, 71(26): 3859

[7] Chen Z Z, Qin Z X, Hu C Y, et al. Ohmic contact formation of Ti/Al/Ni/Au to n-GaN by two-step annealing method. Mater Sci Eng B, 2004, 111(1): 36

Ohmic Contact to an AlGaN/GaN Heterostructure*

Yang Yan†, Wang Wenbo, and Hao Yue

(*Key Laboratory of the Ministry of Education for Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices*, *School of Microelectronics*, *Xidian University*, *Xi'an* 710071, *China*)

Abstract: The ohmic contacts of Ti/Al/Ni/Au on AlGaN/GaN heterostructures are investigated by adopting different Ti/Al structures and thermal annealing processes. The results show that good ohmic contact with a low specific contact resistance of $3.30\times10^{-6}\Omega\cdot cm^2$ is obtained by evaporating a Ti(20nm)/Al(120nm)/Ni(55nm)/Au(45nm) multilayer and annealing for 30s at 850℃ in ultra-high purity N_2 ambient. The ohmic contact has good thermal stability and surface morphology, making it very suitable for manufacturing high performance AlGaN/GaN HEMTs.

Key words: AlGaN/GaN; HEMTs; Ti/Al/Ni/Au; ohmic contact
EEACC: 2520D; 2550
Article ID: 0253-4177(2006)10-1823-05

* Project supported by the National Defense Pre-Research Program of China(No. 41308060106) and the Key Laboratory Program of National Technology(No. 51433040105DZ0102)

† Corresponding author. Email: billy123456@163.com

Received 27 March 2006, revised manuscript received 4 May 2006

©2006 Chinese Institute of Electronics