

文章编号: 1000-7032(2005)03-0399-05

TiAl₃和 Ti/TiAl₃非合金化电极 n型 GaN 欧姆接触的实现

明 帆, 林红斌, 胡成余, 秦志新, 陈志忠, 张国义

(北京大学 物理学院; 人工微结构与介观物理国家重点实验室, 北京 100871)

摘要: 在不进行合金化的情况下, 首次直接采用 TiAl₃ 合金材料作为金属接触电极。在蓝宝石衬底上生长的 n 型载流子浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 GaN 上, 成功地得到低接触电阻的欧姆接触, 并由环形传输线模型方法测得比接触电阻率为 $3 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。与通常 n 型欧姆接触采用的 Ti/Al 双层结构比较, TiAl₃ 合金结构更容易形成非合金化的 n 型欧姆接触。在此实验基础上, 进一步分析了 N 空位和界面层处的 TiAl₃ 在形成非合金化或低温退火欧姆接触中发挥的作用, 由此设计的 Ti/TiAl₃/N/Au 接触结构, 在 TiAl₃ 合金结构基础上明显地降低了接触电阻率。

关键词: 欧姆接触; GaN; TiAl₃ 合金; 反应离子刻蚀; 比接触电阻率

中图分类号: O427.4

PACC: 7280E; 722Q; 7340S

文献标识码: A

1 引 言

近些年来, GaN 因其禁带宽, 耐腐蚀性强, 电子迁移率高等优点, 被广泛用于短波长光电子器件和高迁移率、高功率微电子器件。研究金属电极在 GaN 表面形成的欧姆接触对于降低金属半导体接触的电压损耗、提高器件工作稳定性、延长器件寿命有很重要的应用价值。n 型 GaN 的欧姆接触常采用一定厚度比例的 Ti/Al 双层结构^[1], 通过高温退火来实现。这种设计模式配合镀电极前的表面处理可得到最低比接触电阻率为 $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 数量级的欧姆接触^[2~4]。但高温可能破坏器件的超晶格和量子阱结构, 不利于器件的电学性质设计, 而非合金化的低接触电阻率 n 型 GaN 欧姆接触很难在实验中得到^[5]。未经表面处理的 GaN 镀上 Ti/Al 双层结构在不退火条件下表现为肖特基特性。形成欧姆接触的前提之一是需要洁净的 GaN 的表面, 表面处理的作用在于去除 GaN 表面的氧化物和氢氧化物^[6], 或者增加表面态密度。我们在实验中利用反应离子刻蚀设备, 用 Ar 等离子体处理 GaN 得到新鲜表面, 立即

放入磁控溅射的真空室, 保证 GaN 表面不被氧化。

基于已知的两种形成 n 型 GaN 欧姆接触的主导机制^[7,8]——形成 N 空位和 TiAl₃, 有报道利用 TiAl₃ 合金作为 Ti/Al 双层接触电极的盖层, 在较低温度下退火可以达到与 Ti/Al 双层电极相近的接触电阻率^[9]。我们在研究中第一次直接引入 TiAl₃ 合金作为接触电极材料, 镀电极之前先在反应离子刻蚀设备中用 Ar 离子处理 GaN 表面。在不退火不经过合金化条件下, 由环形传输线模型 (CTLM) 获得了 $3 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 低接触电阻率的欧姆接触。最近有报道可利用反应离子刻蚀设备处理 GaN 表面, 以及 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ 溶液^[10]、 CH_3CSNH_2 溶液^[11] 或王水、KOH 溶液^[6] 浸泡等化学方法对 n 型 GaN 表面进行处理, 可获得最低可达 $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 的比接触电阻率。我们引入的 Ti/TiAl₃ 双层电极材料在仅用 RE 刻蚀的情况下未经其他化学处理已经可得到相同程度的欧姆接触特性。

为改善欧姆接触, 我们做了 Ti/Al 和 TiAl₃ 结构以及 TiAl₃ 和 Ti/TiAl₃ 在不同温度退火下的对

收稿日期: 2004-10-15 修订日期: 2004-12-25

基金项目: 国家“863”计划 (2001AA313110); 北京大学校长基金资助项目

作者简介: 明帆 (1983-), 男, 湖北广水人, 主要从事 n-GaN 器件及欧姆接触特性的研究。

E-mail: mingfan@sina.com, Tel: (010) 62764668

照实验。经环形传输线模型 (CTLM) 方法得出 Ti/TiAl₃/N i/Au 结构形成欧姆接触的比接触电阻率。与通常用的传输线模型 (TLM) 方法相比, CTLM 方法无须对 GaN 表面进行刻蚀, 理论处理完全消除了边缘漏电流的问题。实验结果进一步证实 N 空位是影响不退火 n 型欧姆接触形成的主要机制^[12], 同时说明低功函数金属 Al 在界面层的出现有助于降低接触势垒, 增强接触效果。

2 实 验

关于 Ti i/A i 双层结构形成的 n 型欧姆接触, 有报道利用亮场透射电子显微技术^[13]和 X 射线衍射技术^[14]可观察到接触界面有化合态 TiAl₃ 的形成, 并论述了这种高温退火形成的合金对改善欧姆接触特性的重要性。根据这种机制, 我们直接制作了 TiAl₃ 合金作为电极材料。对蓝宝石衬底上生长出的 n 型载流子浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 电子迁移率 $2.33 \times 10^2 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ 的 GaN, 用磁控溅射方法在两块 GaN 样品上分别镀以 Ti i/A l (20 nm / 60 nm) 双层结构和 TiAl₃ (80nm) 合金结构, 测量了不退火条件下二者的 I-V 特性 (图 1)。

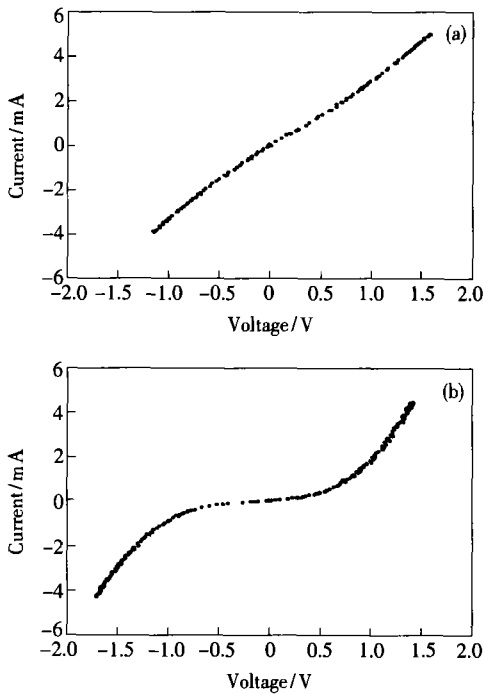


图 1 未退火条件下 TiAl₃ 合金电极 (a) 和 Ti i/A l 双层电极 (b) 的 I-V 特性
Fig 1 I-V behaviors of TiAl₃ alloyed (a) and Ti i/A l bilayer (b) electrodes under nonalloyed condition

对这两种结构在不同温度下 (同一样品的累积温度) 进行了退火的合金实验, 测量得到相应的 I-V 特性变化情况 (图 2 和图 3)。

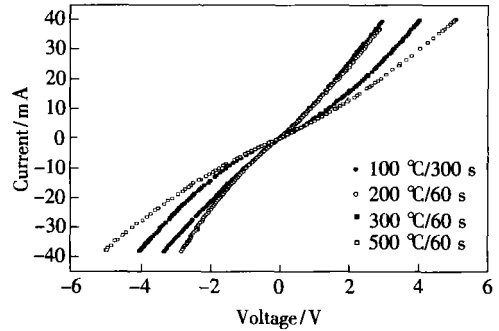


图 2 TiAl₃ 合金电极在不同温度下退火的 I-V 特性
Fig 2 I-V behavior of TiAl₃ alloyed electrode annealed with different temperature

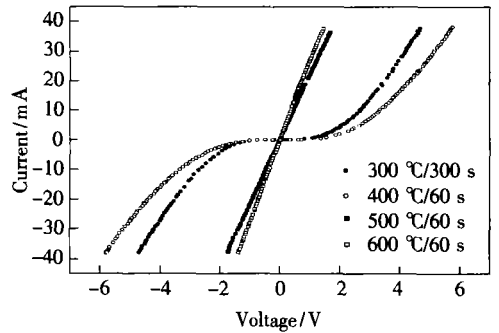


图 3 Ti i/A l 双层电极在不同温度下退火的 I-V 特性
Fig 3 I-V behavior of Ti i/A l bilayer electrode annealed with different temperature

我们用反应离子刻蚀设备对 GaN 进行表面处理 (RIE), 同时为验证 Ti 对 N 空位形成的作用^[12], 进一步设计了 Ti/TiAl₃ (20 nm / 40 nm) 双层电极结构, 与 TiAl₃ (40 nm) 结构进行对比实验。在 Ti/TiAl₃ 双层电极中 Ti 层有助于清洁 GaN 表面, 吸附 GaN 内部的 N 原子形成 N 空位。实验在不退火条件下两种结构均成功实现欧姆接触 (图 4), 利用环形传输线模型 (CTLM) 方法^[14]对 Ti/TiAl₃/N i/Au 电极形成欧姆接触的比接触电阻率进行了测量, 并由直线拟合得到 ρ_c 为 $3 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

我们还对 TiAl₃ (40 nm) 合金结构和 Ti/TiAl₃ (20 nm / 40 nm) 双层电极结构在不同温度下进行了退火 (合金化) 实验。

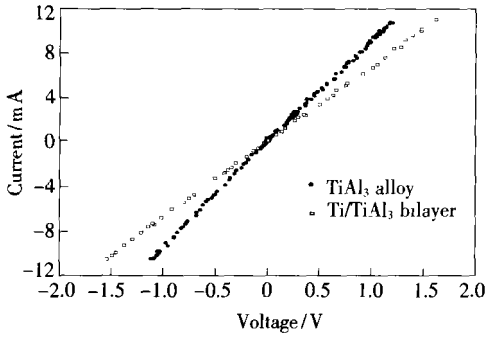


图 4 经过反应离子刻蚀处理后的 $TiAl_3$ 合金电极和 $Ti/TiAl_3$ 双层电极表现为欧姆特性

Fig 4 $TiAl_3$ alloyed and $Ti/TiAl_3$ bilayer electrode behaves as ohmic contact after applying a RIE process

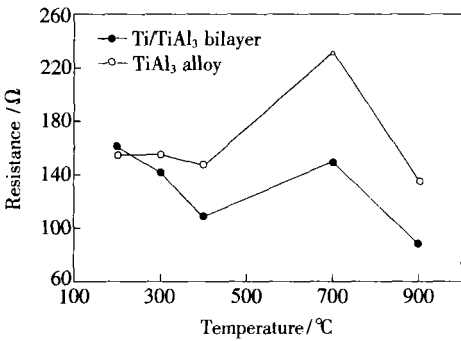


图 5 在相同电流下, 退火温度对 $Ti/TiAl_3$ 双层结构和 $TiAl_3$ 合金结构的固定两电极间电阻的影响

Fig 5 Different annealing temperature effects on the resistance between two fixed electrodes of $Ti/TiAl_3$ bilayer and $TiAl_3$ alloyed structure respectively under the same conducting current

3 结果分析与讨论

不退火条件下测量 Ti/Al 双层结构和 $TiAl_3$ 合金结构的 $I-V$ 特性, 结果显示在未进行合金时这两种结构均表现出不同程度的肖特基特性, 但可以看出 $TiAl_3$ 合金结构明显更趋于欧姆接触特性。这表明接触界面上的 $TiAl_3$ 作为接触层非常有效地降低了接触势垒, 引入 $TiAl_3$ 确实起到改善接触界面的电流传导的作用。

这两种结构在不同温度下经合金的退火实验后 (图 2 和图 3), 发现退火对 $TiAl_3$ 合金电极性能改变不大, 某些温度下接触特性甚至会变差; Ti/Al 电极高温下的 $I-V$ 特性迅速改善, 且在 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 达到欧姆接触, 低于文献上提到的不经任何 GaN 表面处理需 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 达到欧姆接触的退火条件^[1-15]。得到这种实验结果是合理的, 这表明退

火对于 Ti/Al 双层电极来说, 作用在于使得 Ti 和 Al 相互扩散, 在 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 附近 Ti 和 Al 在接触界面反应形成 $TiAl_3$, 从而大幅度改善接触特性。但高温可能不容易形成 $TiAl_3$ 合金的整体扩散, 所以退火对接触影响不大。

从未合金时两种结构的 $I-V$ 特性来看, $TiAl_3$ 合金结构在不退火时已经表现出很好的 $I-V$ 特性, 未能得到欧姆接触的原因应该是镀电极前 GaN 表面的氧化层阻碍了 Ti 与半导体的紧密接触。 $Ti/TiAl_3$ 双层结构和 $TiAl_3$ 结构的对比实验表明在 $Ti/TiAl_3$ 双层电极中 Ti 层有助于清洁 GaN 表面, 吸附 GaN 内部的 N 原子形成 N 空位。图 4 表明实验成功得到了这两种结构形成的欧姆接触。可见清除 GaN 表面的氧化层以形成 Ti 与 GaN 表面的紧密接触对于未退火形成欧姆接触仍很重要。由图 4 同时也发现增加 Ti 在接触界面的含量在不退火时并无明显作用, 这可能是因为接触界面上不形成化合态的多余 Ti 未能被激活参与形成 TiN 。

实验结果显示了大部分退火温度对 $TiAl_3$ 合金结构形成的欧姆接触有所改善, 但不如对改善 $Ti/TiAl_3$ 双层电极结构形成的欧姆接触明显 (图 5)。图示表明 $Ti/TiAl_3$ 双层电极相比 $TiAl_3$ 合金电极在高温下表现出更好的欧姆接触特性。这一结果充分说明接触界面多余的 Ti 在高温下穿透区域氧化层参与形成 TiN , 造成半导体层的 N 空位, 提高半导体与接触层之间的薄层电子浓度, 进而增强接触界面处的电流传导能力。

4 结 论

对于不退火或低温退火形成的 n 型 GaN 欧姆接触, 在我们引入的 $TiAl_3$ 合金结构作电极材料的实验过程中, 对 GaN 表面的处理以去除氧化层的工序仍很重要, 可保证 Ti 与 GaN 的紧密接触, 形成 TiN 并造成 N 空位。但与高温退火作用类似, 不退火条件下 $TiAl_3$ 在接触界面的出现可明显地改善欧姆接触特性。基于这一点, 引入 $TiAl_3$ 合金材料的实验证明合金靶可起到类似于高温退火的作用, 从而有效地避免了高温退火对器件量子阱和超晶格结构的破坏。因此, 一定厚

度比例的 Ti/TiAl₃ 双层电极结构可很好地结合上述两个特点, 实现不退火或低温退火下低特殊接触电阻率的欧姆接触。

值得注意的是, 氧化层在接触界面的出现是难以避免的, 因此高温退火的另一优点, 使 Ti 穿

透局域氧化层与 GaN 反应形成更多的 N 空位, 在我们所做的不合金或低温合金的实验里还不能实现。不过对于退火温度有较高要求的光电子器件和微电子器件, 引入 TiAl 合金材料具有一定应用前景。

参 考 文 献:

- [1] Pelto C M, Chang Y A, Chen Y, *et al*. Issues concerning the preparation of ohmic contact to n-GaN [J]. *Solid-state Electron.*, 2001, **45**(9): 1597-1605.
- [2] Luther B P, Mohney S E, Jackson T N, *et al*. Investigation of the mechanism for ohmic contact formation in Al and Ti/Al contacts to n-type GaN [J]. *Appl Phys Lett*, 1997, **70**(1): 57-59.
- [3] Lin M E, Ma Z, Huang F Y, *et al*. Low resistance ohmic contacts on wide band-gap GaN [J]. *Appl Phys Lett*, 1994, **64**(8): 1003-1005.
- [4] Lin Y J, Chen Y M, Chen T J, *et al*. Schottky barrier height and nitrogen-vacancy-related defects in Ti alloyed ohmic contacts to n-GaN [J]. *J. Appl Phys*, 2004, **95**(2): 571-575.
- [5] Papanicolaou N A, Zekentes K. High temperature characteristics of Ti/Al and Cr/Al ohmic contacts to n-type GaN [J]. *Solid-State Electron.*, 2002, **46**(11): 1975-1981.
- [6] Motayed A, Jah M, Shana A, *et al*. Two-step surface treatment technique: Realization of nonalloyed low-resistance Ti/Al/TiAu ohmic contact to n-GaN [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2004, **22**(2): 663-667.
- [7] Lester L F, Brown J M, Ramer J C, *et al*. Nonalloyed Ti/Al ohmic contacts to n-type GaN using high-temperature pre-oxidation anneal [J]. *Appl Phys Lett*, 1996, **69**(18): 2737-2739.
- [8] Ruvimov S, Linlenta-Weber Z, Washburn J, *et al*. Microstructure of Ti/Al ohmic contacts for n-GaN [J]. *Appl Phys Lett*, 1998, **73**(18): 2582-2584.
- [9] Pelto C M, Chang Y A, Chen Y, *et al*. Thermally stable oxidation resistant capping technology for Ti/Al ohmic contact to n-GaN [J]. *J. Appl Phys*, 2002, **92**(8): 4283-4289.
- [10] Lee C T, Lin Y J, Lin C H. Nonalloyed ohmic mechanism of TiN interfacial layer in Ti/Al contacts to (NH₄)₂O₂S_x-treated n-type GaN layers [J]. *J. Appl Phys*, 2002, **92**(7): 3825-3829.
- [11] Song J O, Park S J, Seong T Y. Effects of sulfur passivation on Ti/Al ohmic contacts to n-type GaN using CH₃CSNH₂ solution [J]. *Appl Phys Lett*, 2002, **80**(17): 3129-3131.
- [12] Zhao Z M, Jiang R L, Chen P, *et al*. Ti/Al/Pt/Au and Al ohmic contacts on Si-substrated GaN [J]. *Appl Phys Lett*, 2001, **79**(2): 218-220.
- [13] Ruvimov S, Weber Z L, Washburn J, *et al*. Microstructure of Ti/Al and Ti/Al/Ni/Au ohmic contacts for n-GaN [J]. *Appl Phys Lett*, 1996, **69**(11): 1556-1558.
- [14] Rechil J, Heime K. Concentric ring contacts used for the determination of contact resistances [J]. *Solid-state Electron.*, 2000, **44**(3): 451-455.
- [15] Gasser S M, Kolwa E, Nicolet M-A. Reaction of aluminum-on-titanium bilayer with GaN: influence of the Al/Ti atomic ratio [J]. *J. Electron. Mat.*, 1999, **28**(8): 949-954.

Realization of Nonalloyed TiAl₃ And Ti/TiAl₃ Ohmic Contact to n-GaN

M NG Fan, LN Hong-bin, HU Cheng-yu, QN Zhixin, CHEN Zhizhong, ZHANG Guo-yi

(State Key Laboratory of Artificial Microstructure and Mesoscopic Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract The realization of ohmic contact to n-GaN is usually achieved by using Ti/Al bilayer electrodes

with high temperature annealing. Nevertheless, the process of high temperature annealing may destruct the electronic structure of devices, such as quantum well and superlattice structure. The ultimate objective of this research work is to obtain low resistance ohmic contact to n-GaN without high temperature annealing, thus avoiding the destruction of electronic structure effectively. In the research, both nonalloyed condition and low temperature annealing are applied.

Under nonalloyed condition, we firstly use alloyed $TiAl_3$ as contact electrode material directly on n-GaN with carrier concentration of $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Compared with conventional Ti/Al bilayer structure, alloyed $TiAl_3$ structure facilitates the realization of nonalloyed n-type ohmic contact. However, with annealing at 500°C , the contact behavior of Ti/Al bilayer is improved rapidly and achieves ohmic, which is lower than the temperature assumed in some papers. After applying RIE process, both Ti/Al bilayer and $TiAl_3$ alloyed electrodes behave ohmic, which indicates that the surface of GaN is cleaning, thus intimate contact of Ti and GaN is vital to achieve ohmic contact to n-GaN. In the further experiment, $Ti/TiAl_3$ bilayer structure is introduced to compare with $TiAl_3$ alloyed structure. Both of the two structures behave ohmic with RIE process, yet $TiAl_3$ alloyed shows lower contact resistance, and excess Ti has no obvious effect to contact behavior under nonalloyed condition. After annealing with different temperature, $Ti/TiAl_3$ bilayer structure tends to form an ohmic contact with lower contact resistance. It proves that excess Ti is activated to form ohmic contact at high temperature annealing. Further analysis implies both of the nitrogen vacancies and $TiAl_3$ mechanisms play a critical role to form a low contact resistance ohmic contact to n-GaN, under the condition of nonalloyed or low annealing temperature. Accordingly, based on alloyed $TiAl_3$ structure, $Ti/TiAl_3/Ni/Au$ structure is designed, which decreases the contact resistance significantly, and the specific contact resistance of $3 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ is obtained with CTM measurement.

The introduction of $TiAl_3$ alloyed material can make a role as high temperature annealing in the aspect of forming $TiAl_3$ at the interface. With a certain thickness ratio, $Ti/TiAl_3$ can achieved low ohmic contact with low temperature annealing. Therefore, $TiAl_3$ alloyed will be promising in the application field of photoelectron and micro-electron devices that require strict temperature conditions.

Key words ohmic contact; GaN; alloyed $TiAl_3$; RIE; specific contact resistance

Received date: 2004-10-25

《发光学报》进入科技精品库

《中国知识资源总库·科技精品库》是目前我国最大的综合性知识信息库。该库充分利用现代网络技术条件, 将使我国优秀科技期刊以最快的速度、在最广泛的范围得以传播。通过对《中国期刊全文数据库》中近 8 000 种期刊 10 年的引文统计分析与综合评价, 筛选出 500 种高水平科技期刊, 进行全面系统、完整的数字化整合, 以期建成我国具有代表性的、完备的、系统的国家级期刊精品库。由中国物理学会发光分会和我所主办的《发光学报》于 2004 年在近 8 000 种期刊中荣幸地跻身于 500 强精品之一, 进入科技精品库。这是对《发光学报》学术水平、出版质量的充分肯定, 也是所领导和编辑部几代同仁共同努力的结晶。学报编辑部经努力整理出创刊以来(直至追溯到 1970 年的手刻油印本)一套完整的《发光学报》藏本送到北京《科技精品库》, 现已完成由纸质版转化为电子版的前期录制工作, 三年后《科技精品库》将正式启用。《发光学报》将成为发光学发展过程的珍贵记录而载入历史史册, 在知识创新与科技交流中将起到积极的推动作用。