

n-GaN 基 Ti/Al/Ni/Au 的欧姆接触高温特性^{*}

张跃宗[†] 冯士维 张弓长 王承栋 吕长志

(北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100021)

摘要: 研究了在高温工作环境下 Ti/Al/Ni/Au(15nm/220nm/40nm/50nm)四层复合金属层与 n-GaN 的欧姆接触的高温工作特性. 退火后样品在 500℃ 高温下工作仍能显示出良好的欧姆接触特性; 接触电阻率随测量温度的增加而增大, 且增加幅度与掺杂浓度有密切关系. 掺杂浓度越高, 其接触电阻率随测量温度的升高而增加越缓慢; 重掺杂样品的 Ti/Al/Ni/Au-n-GaN 欧姆接触具有更佳的高温可靠性; 当样品被施加 500℃, 1h 的热应力后, 其接触电阻率表现出不可恢复性增加.

关键词: 欧姆接触; 接触电阻率; 退火; 高温

PACC: 7340C; 9160K; 7340S

中图分类号: TN306

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)06-0984-05

1 引言

GaN 材料由于具有优秀的物理化学性能以及广泛的应用前景一直吸引着人们的研究兴趣. GaN 是宽带隙和直接带隙半导体材料, 熔点高、热导率高, 其导带结构使饱和速率达 $3 \times 10^7 \text{ cm/s}$, 是制造紫、蓝发光二极管(LED)、激光器(LD)及光电探测器的理想材料. 同时 GaN 在高温、高功率微电子器件方面也有着广阔的应用前景. 自从 GaN 基场效应器件问世及应用以来, 其高温特性受到人们的关注和研究^[1]. 由于欧姆接触是制造许多光电器件(如 HEMT, MQW-LED 等)的关键工艺, 因此对于 GaN 基器件欧姆接触温度特性的研究成为当前人们关注的课题之一^[2,3]. 特别是高温恶劣环境下, 欧姆接触的特性变化还未见有深入研究.

我们把高温环境分为以下几种情况: 首先是样品经高温退火形成欧姆接触后在室温下测其可靠性; 其次, 样品在形成欧姆接触后在封闭的高温环境中放置不同时间后, 在室温下测其可靠性^[4]; 以及样品在形成欧姆接触后, 直接在高温环境工作中研究其欧姆接触的可靠性及其退化情况.

从以上可以看出, 前两种情况都是在高温环境下, 形成欧姆接触或高温存储后在室温下进行测量, 目前的研究现状也基本都局限于这两种情况. 关于高温工作环境下, GaN 基欧姆接触的温度稳定性和可靠性^[5], 尤其是当工作温度达到 500℃ 时的结果,

还鲜有报道.

2 实验

利用 MOCVD 技术在蓝宝石衬底(400 μm)上, 沿(0001)方向生长 n-GaN, 生长步骤为: 首先用氢等离子体对衬底进行清洗, 清洗过后生长 1 μm 厚的 GaN 层, 其中掺杂浓度分别为 $N_d = 3.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_d = 3.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; 生长完成后对样品表面进行反应离子刻蚀(RIE), 用传统的台面隔离方法刻蚀台阶结构, 然后在 GaN 晶片上蒸发四层不同金属合金序列 Ti/Al/Ni/Au(15nm/220nm/40nm/50nm), 合金条件分别为 800℃, 30s; 900℃, 30s; 950℃, 30s.

高温测量部分的装置是整个实验的关键和难点. 我们对欧姆接触样品采用热稳定性较好的超声引线键合, 非气密性双列直插(DIP)陶瓷封装, 然后置于气密性比较好的高温箱式炉中, 用耐高温导线连接被测封装样品, 同时为避免样品在高温环境中氧化, 测量过程中始终通以高纯氮气, 通过流量计加以控制. 测量设备采用高精度 KEITHLEY2400 源和 KEITHLEY2000 多功能数字表并配以 Scan Card 实现对各个测量点的瞬间测量, 保障了多个被测点能够在同一温度下采集数据; 整个测试系统的终端应用计算机通过程序来控制所有测量仪表. 本测试系统具有自动化、人机分离等特点, 系统结构如图 1 所示.

^{*} 国家高技术研究发展计划资助项目(批准号: 2006AA03A112)

[†] 通信作者. Email: zhangyz@emails.bjut.edu.cn

2006-10-12 收到, 2006-12-28 定稿

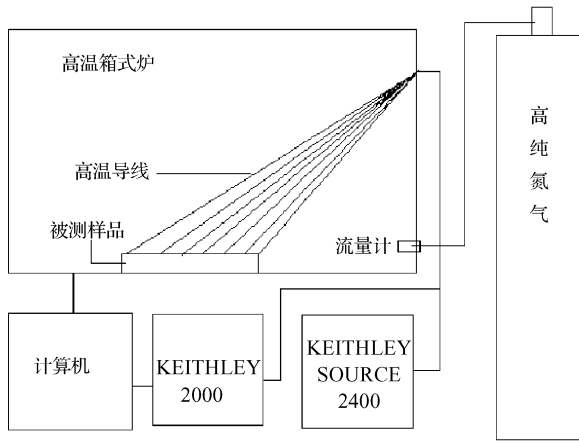


图 1 高温测试系统结构图

Fig.1 High temperature measurement system configuration

3 结果与讨论

3.1 欧姆接触的退火特性

我们对制备的多层合金欧姆接触样品 Ti/Al/Ni/Au(15nm/220nm/40/nm/50nm) n-GaN ($N_d = 3.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) 进行了三种不同退火工艺,分别为 800°C , 30s; 900°C , 30s; 950°C , 30s. 应用 TLM 法在室温下对其进行 $I-V$ 特性测量,结果如图 2 所示.

由图 2 可以看出,对三种不同退火条件下的样品测量点进行线性拟合后均呈线性,所以可认为都形成了良好的欧姆接触,但由三种样品的 $I-V$ 特性可知退火条件为 800°C , 30s 的样品表现出了最佳的欧姆接触.

3.2 欧姆接触的高温工作特性

我们在两种掺杂浓度的 GaN 衬底上,制备了欧

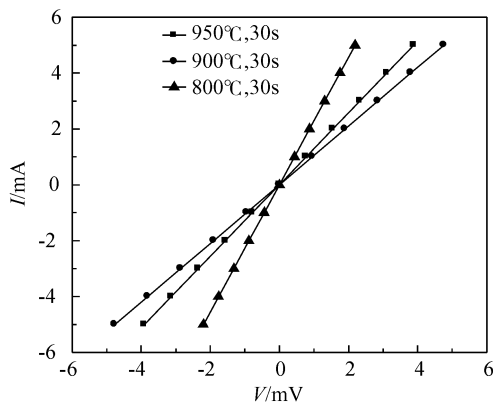


图 2 室温下不同退火条件样品的 $I-V$ 特性

Fig.2 Room temperature $I-V$ characteristics of different annealing conditions samples

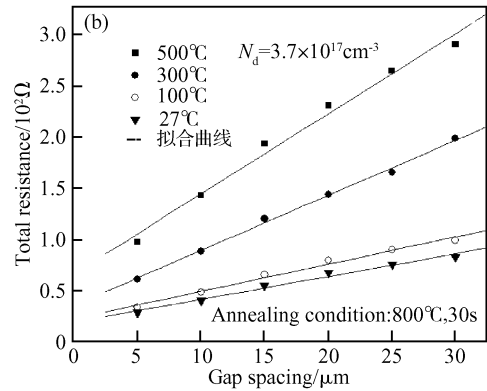
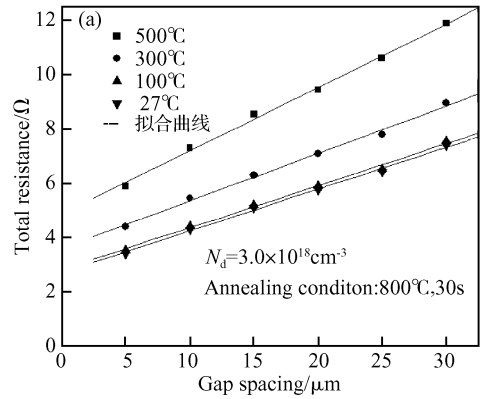


图 3 不同测量温度下 Ti/Al/Ni/Au-GaN (800°C , 30s) 欧姆接触间电阻与接触间距的关系

Fig.3 Total resistance versus gap spacing of the Ti/Al/Ni/Au-GaN ohmic contact at different high measurement temperatures

姆接触样品,其合金工艺条件,与前面相同.测量了 TLM 法中,随环境温度变化,两欧姆接触间电阻 R_T (total resistance) 与相邻欧姆接触间距 (gap spacing) 之间的关系,结果如图 3(a) 和 (b) 所示.

测量的温度分别为室温 (27°C), 100, 300 和 500°C , 然后对数据点应用最小二乘法拟合,可以看出,测量的结果接触间总电阻随欧姆接触间距的变化,呈现良好的线性关系.

我们通过作图,使用传输线法,对图 3(a) 和 (b) 分别计算其欧姆接触电阻率 ρ_c 得到图 4.

在同一退火合金条件下 (800°C , 30s), 样品 B ($N_d = 3.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) 和 C ($N_d = 3.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 由于掺杂浓度的不同,测量环境温度变化时,它们的接触电阻率随变化趋势如图 4 所示.这两个样品掺杂浓度不同,合金金属材料均为 Ti/Al/Ni/Au. 首先其接触电阻率都随环境温度的升高而呈现出增加的趋势;其次对于轻掺杂样品 B,其接触电阻率更接近于线性增加,而对于重掺杂样品 C,随着测量温度的增加,其接触电阻率的增加幅度也明显增大;以及在相同测量温度下,重掺杂样品的接触电阻率明显

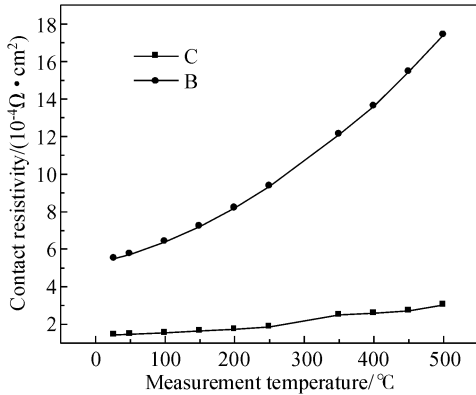


图 4 相同退火条件下的 Ti/Al/Ni/Au-GaN 欧姆接触在不同掺杂浓度下随测量温度的变化关系
Fig.4 Changes of different doping concentration Ti/Al/Ni/Au-GaN ohmic contact sample with measurement temperature

低于轻掺杂样品. 由以上讨论可知, 重掺杂样品的 Ti/Al/Ni/Au-GaN 欧姆接触, 在环境温度高于 300°C 以后, 其温度的稳定性明显优于轻掺杂样品.

在金属-半导体紧密接触条件下, 隧穿载流子成为电流最主要的形式. 则隧穿区域的接触电阻可以表示为^[6]:

$$\rho_c \propto \exp\left(\frac{2\Phi_B}{\sqrt{N_D}} \times \frac{\sqrt{k_s \epsilon_0 m^*}}{qh}\right) \quad (1)$$

若热电发射为主要机制, 则接触电阻可以表示为:

$$\rho_c = \frac{k_B}{A^* qT} e^{\Phi_B/k_B T} \quad (2)$$

在低掺杂浓度时, 热电发射为主要机制, 如图 5 所示. 那么此时温度对接触电阻的影响较大, 这在公式(2)中可以看出. 所以我们看到图 4 中对于轻掺杂样品 C 的曲线随测量温度的变化比重掺杂要大得多; 而在重掺杂浓度时, 由图 5 可以看出, 隧道击穿为主要机制, 在温度不高时接触电阻对温度的依赖性较弱, 这在公式(1)中也可以看出. 但随着温度的继续增加, 由于几种金属层和 GaN 中的 Ga 原子向内和向外扩散形成了一个薄的界面层, 结果, 金属-半导体的紧密接触条件不再成立, 而是热电发射成为主要的传输机理, 接触电阻率随测量温度缓慢增加^[7].

3.3 欧姆接触的高温存储特性

将 Ti/Al/Ni/Au-n-GaN 欧姆接触样品置于高温箱中, 对样品持续加 500°C 高温 24h.

分别采集 0, 5, 10, 15, 20 和 25h 几个点进行数据测量得到如图 6 所示结果.

由图 6 中可以看出, 接触电阻率随存储温度的

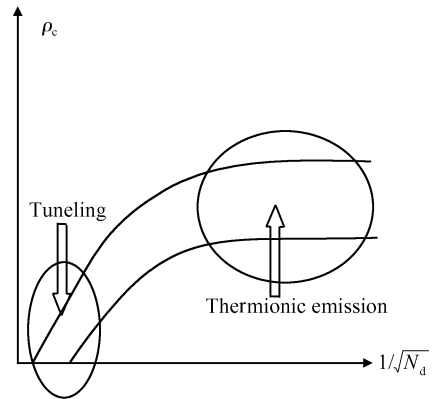


图 5 室温下接触电阻与掺杂浓度的关系
Fig.5 Relationship between contact resistance and doping concentration at room-temperature

升高(100~500°C)而增加, 说明接触随存储温度增加而开始退化; 另一方面, 在存储温度为 100°C, 存储时间 0~24h 过程中, 接触电阻率变化很小, 而在 500°C 高温存储 0~24h 过程中, 接触电阻率随存储时间明显地增加, 尤其 10h 前增加比较明显, 但增加量不是很大, 存储 20h 后趋于稳定. 因此, 在 500°C 热应力下的高温存储使得接触发生了明显退化.

另外由于某些 GaN 器件需要在高温等恶劣环境下工作, 因此讨论分析其在高温下欧姆接触的恢复特性就显得尤为重要. 我们实验分析了相同退火条件下的 Ti/Al/Ni/Au-GaN 欧姆接触样品在被施加 500°C, 1h 热应力后其 I-V 特性, 如图 7 所示.

从图 7 中的 I-V 曲线可以看出, 当 Ti/Al/Ni/Au-GaN 欧姆接触样品在被施加 500°C, 1h 热应力恢复到室温后, 样品阻值增大. Fan 等人^[8]得到 Ti/Al/Ni/Au(15nm/220nm/40nm/50nm)合金序列与

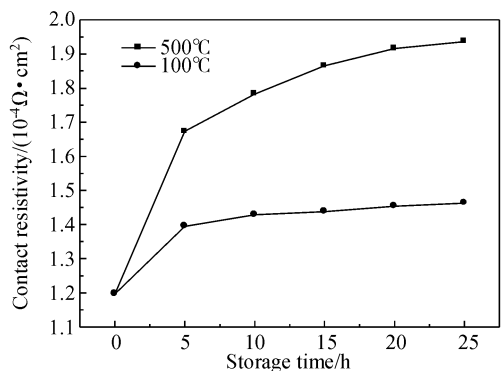


图 6 Ti/Al/Ni/Au-N-GaN 欧姆接触样品经过 500°C (0~24h) 高温存储后接触电阻率的变化
Fig.6 Changes of contact resistivity after 500°C high temperature storage of Ti/Al/Ni/Au-N-GaN sample

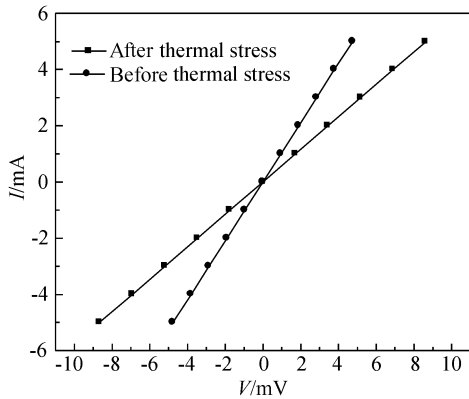


图 7 Ti/Al/Ni/Au-GaN 欧姆接触样品在加热 500℃, 1h 前后返回室温后的 I-V 特性

Fig. 7 I-V characteristic before and after Ti/Al/Ni/Au-GaN ohmic contact were forced thermal stressing

n-GaN($N_d = 4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)经 900℃, 30s 后形成最佳的欧姆接触,通过 XRD 及 AES 等检测到 Ti_xAl_y 合金相的出现,且表明 x, y 的比例达到最佳比例;因此当施加 500℃ 热应力达 1h 时可以认为仍然会有这种机制的存在与发生,即温度增加时使得一部分 Al 原子继续扩散入和扩散出 Ti 层,破坏了原有 Ti, Al 原子的最佳比例,这样破坏了原有样品的最佳欧姆接触.同时对同一样品施加热应力前后的接触电阻率进行了计算如表 1 所示.

通过表 1 可以很清楚地看出在经过 500℃, 1h 的热应力后接触电阻率和原来相比有了一定程度的增大,因为样品是在经过热应力后恢复至室温时测得,所以这种增大是不可恢复的.这与图 7 一起证明了在高温应力过程中,原有的良好欧姆接触被破坏从而导致接触电阻率的增加.

4 结论

本文研究了在高温(500℃)工作环境下 Ti/Al/Ni/Au (15nm/220nm/40/nm/50nm) 四层复合金属层与 n-GaN($N_d = 3.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_a = 3.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)的欧姆接触特性.

表 1 同一样品在加热后当温度恢复到室温时与加热前欧姆接触电阻率 ρ_c 的对比

Table 1 Room-temperature contact resistivity contrast before and after thermal stressing at 500℃ for 1h

样品材料	室温测量	$\rho_c / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$
Ti/Al/Ni/Au-GaN (800℃, 30s, $N_d = 3.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)	加 500℃, 1h 前	1.431×10^{-5}
	加 500℃, 1h 后	1.919×10^{-5}

不论样品的掺杂浓度如何,其接触电阻率均随测量温度的增加而增大,但增加的趋势与掺杂浓度有关:轻掺杂样品的接触电阻率增加迅速,重掺杂样品的接触电阻率增加缓慢.

在同一测量温度下轻掺杂样品的接触电阻率始终高于重掺杂样品.因此,重掺杂 n-GaN 样品的 Ti/Al/Ni/Au 欧姆接触具有更佳的温度可靠性.

当样品被施加 100℃ 热应力并持续 24h,其接触电阻率变化不大未发生明显退化;当被施加 500℃ 热应力 24h 后,其接触电阻率发生了显著增加,表明接触退化.

对于相同退火条件下(800℃, 30s)的欧姆接触样品,在施加高温应力 500℃, 1h 后,其欧姆接触开始表现出一定程度的退化,样品总电阻增大,相应的接触电阻率明显增加,并且这种增加具有不可恢复性.

致谢 感谢北京光电子实验室为本实验制备样品;感谢北京宇翔电子有限公司张路总工程师提供封装等帮助.本文得到中电集团五十五所总装备部重点实验室的支持.

参考文献

- [1] Mishra U K, Wu Y F, Keller B P, et al. GaN microwave electronics. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1998, 46(2): 756
- [2] Zhang Jinwen, Zhang Taiping, Wang Wei, et al. Ohmic contact performance between Ti/Al/Ti/Au and AlGaIn. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(6): 737 (in Chinese)[张锦文, 张太平, 王玮, 等. Ti/Al/Ti/Au 与 AlGaIn 欧姆接触特性. 半导体学报, 2001, 22(6): 737]
- [3] Zhou Huimei, Shen Bo, Zhou Yugang, et al. Metal/n-AlGaIn ohmic contact. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(2): 153 (in Chinese)[周慧梅, 沈波, 周玉刚, 等. 金属/n 型 AlGaIn 欧姆接触. 半导体学报, 2002, 23(2): 153]
- [4] Motayed A, Bthe R, Wood M C, et al. Electrical, thermal, and microstructural characteristics of Ti/Al/Ti/Au multi-layer ohmic contacts to n-type GaN. J Appl Phys, 2003, 93(2): 1087
- [5] Zhang Xiaoling. The study on AlGaIn/GaN HEMTs. PhD Dissertation of Beijing University of Technology, 2005: 39 (in Chinese)[张小玲. AlGaIn/GaN HEMTs 的研究. 北京工业大学博士论文, 2005: 39]
- [6] Shen T C, Gao G B, Morkoc H. Developments in ohmic contacts for III-V compound semiconductors. J Vac Sci Technol B, 1992, 10(5): 2114
- [7] Lü Changzhi, Chen Hongnai, Lü Xiaoliang, et al. Temperature and doping-dependent resistivity of Ti/Au/Pd/Au multi-layer ohmic contact to n-GaN. J Appl Phys, 2002, 91(11): 9218
- [8] Fan Zhifang, Mohammad S N, Kim W, et al. Very low resistance multilayer ohmic contact to n-GaN. Appl Phys Lett, 1996, 68(12): 1672

High Temperature Characteristics of Ti /Al /Ni /Au Multilayer Ohmic Contact to n-GaN*

Zhang Yuezong[†], Feng Shiwei, Zhang Gongchang, Wang Chengdong, and Lü Changzhi

(School of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: The high temperature characteristics of the ohmic contact of Ti/Al/Ni/Au (15nm/220nm/40nm/50nm) multilayer contacts to n-type GaN ($N_d = 3.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_d = 3.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) are studied. The annealed samples still show excellent ohmic contact characteristics at 500°C. Contact resistivity increases with the rise of temperature. Furthermore, the tendency of increase is related to doping concentration: The higher the doping concentration, the slower the increase of the contact resistivity with the temperature. Ti/Al/Ni/Au ohmic contact to heavy doping n-GaN has better high temperature reliability. The contact resistivity shows unrecoverable characteristics after the samples are placed under the thermal stress.

Key words: ohmic contact; specific contact resistivity; annealing; high temperature

PACC: 7340C; 9160K; 4340S

Article ID: 0253-4177(2007)06-0984-05

* Project supported by the National High Technology Research and Development Plan of China (No.2006AA03A112)

[†] Corresponding author. Email: zhangyz@emails.bjut.edu.cn

Received 12 October 2006, revised manuscript received 28 December 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics