

# Ti/Al/Ti/Au 与 AlGaN 欧姆接触特性

张锦文 张太平 王 玮 宁宝俊 武国英

(北京大学微电子研究所, 北京 100871)

**摘要:** 研究了溅射 Ti/Al/Ti/Au 四层复合金属与 AlGaN/GaN 的欧姆接触特性, 并就环境温度对欧姆接触特性的影响进行了分析研究. 试验证实: 溅射的 Ti/Al/Ti/Au 与载流子浓度为  $2.24 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  的 AlGaN 之间在室温下无需退火即可形成欧姆接触. 随快速退火温度的升高接触电阻降低. 快速退火时间 30s 已可实现该温度下最佳欧姆接触. 当工作温度不高于  $300^\circ\text{C}$  时接触电阻几乎不受温度的影响.

**关键词:** AlGaN; Ti/Al/Ti/Au; 欧姆接触

**PACC:** 7340N

**中图分类号:** TN304.2<sup>+</sup>6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2001)06-0737-04

## 1 引言

近几年来, 宽禁带 GaN 及其三元合金  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  倍受研究者的重视. 它们的应用主要有两方面: (1) 因其禁带宽度大, 而且随 Al 含量的不同而变化, 广泛用于制备可见及紫外光激光器、用于显示和存储的发光二极管以及紫外光探测器等; (2) 因其化学稳定性好, 有很高的电子饱和漂移速度, 使其在高温微电子器件及大功率微波器件方面有很大的优势.

要制备高性能的 AlGaN FETs, 形成良好的金属与 AlGaN 接触是很重要的. 这主要包括两方面, 一是形成源漏的欧姆接触, 二是形成栅的肖特基接触. 这两方面的研究报道很多, 对其性能也有了基本的了解, 但仍有很多的问题, 无论是材料的制备还是器件工艺都还不成熟, 表现在不同研究者的结果不同<sup>[1]</sup>, 有待于深入地研究. 目前, 用作肖特基接触的金属主要有 Au、Ti、Pt、Ni、Cr<sup>[2-6]</sup> 等. 欧姆接触基本上都采用功函数较小的 Ti, 只是在 Ti 以上的金属有所不同.

本文以 Ti/Al/Ti/Au 四层复合金属作为欧姆接触, 研究其与 AlGaN/GaN 形成欧姆接触的退火条件, 并就工作温度对欧姆接触的影响进行了研究.

## 2 试验

采用 MOCVD 方法在蓝宝石衬底上生长 AlGaN/GaN, 其结构见图 1(a). 其中, i-GaN 层厚度约

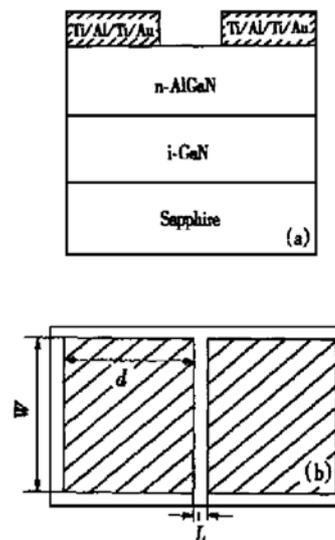


图 1 AlGaN/GaN 材料及欧姆接触结构示意图

FIG. 1 Schematics of AlGaN/GaN Material and Ohmic Contact Structure

$2\mu\text{m}$ , n-AlGaN 厚度约 200nm, Al 含量为 15%, 霍

张锦文 女, 1969 年出生, 硕士, 现在北京大学微电子所工作.  
2000-04-24 收到, 2000-07-21 定稿

尔测量室温下 n-AlGaIn 载流子浓度  $n = 2.24 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 迁移率  $\mu = 600 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ .

台面用  $\text{BCl}_3$  干法刻蚀获得. 采用 Sputter Film 公司的多靶溅射台, 在 AlGaIn 上连续溅射形成 Ti/Al/Ti/Au 多层膜, 经剥离工艺形成接触块, 多层膜厚度为 20nm/200nm/50nm/200nm. 用光快速退火炉对样品进行退火. 使用 HP4156B 测试欧姆接触特性及其温度特性.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 欧姆接触的退火特性

用于测试欧姆接触特性的结构如图 1(b) 所示, 图中阴影部分是在 AlGaIn 表面上溅射的 Ti/Al/Ti/Au 四层复合金属, 其面积为  $120 \mu\text{m} \times 120 \mu\text{m}$ , 接触块两极间距  $L$  为  $10 \mu\text{m}$ . 欧姆接触特性的测量由  $I-V$  曲线表征, 该曲线斜率表征的电阻由以下两部分串联组成: 接触电阻  $R_c$  及 AlGaIn 薄膜电阻  $R'$  (忽略源漏区下的寄生电容), 即:

$$R = 2R_c + R'$$

室温下的 AlGaIn 薄膜电阻可由以下公式计算得出:

$$R'_0 = R_s \frac{L}{W} = \frac{1}{ns\mu q} \times \frac{L}{W}$$

式中  $R_s$  为 AlGaIn 薄膜的面电阻;  $q$  为基本电荷;  $L$ 、 $W$  定义见图 1(b). 对于串联的 AlGaIn 电阻, 虽然接触面积较大, 但是起作用的只有很窄的一部分, 近似取  $L = 10 \mu\text{m}$ ,  $W = 120 \mu\text{m}$ , 代入室温下的面载流子浓度和迁移率数值, 则有  $R_s = 233.04 \Omega$ ,  $R'_0 = 19.45 \Omega$ . 根据传输线模型, 接触电阻可表示为:

$$R_c = \frac{(R_s \rho_c)^{1/2}}{W} \coth \left[ \left( \frac{R_s}{\rho_c} \right)^{1/2} d \right]$$

其中  $\rho_c$  为接触电阻率;  $d$  定义见图 1(b). 如果接触块宽度  $d$  较大, 则  $\coth \left[ \left( \frac{R_s}{\rho_c} \right)^{1/2} d \right]$  可趋近于 1, 这时上式可简化为:

$$R_c = \frac{(R_s \rho_c)^{1/2}}{W}$$

那么有:

$$\rho_c = \frac{(WR_c)^2}{R_s}$$

由于 Au 的熔点为  $1060^\circ\text{C}$ , 所以对样品分别在  $500^\circ\text{C}$ 、 $600^\circ\text{C}$ 、 $700^\circ\text{C}$ 、 $800^\circ\text{C}$  和  $900^\circ\text{C}$  下快速退火 30s, 然后在室温下测量  $I-V$  曲线, 结果示于图 2, 由此计算出相

应温度下的接触电阻和接触电阻率, 见表 1.

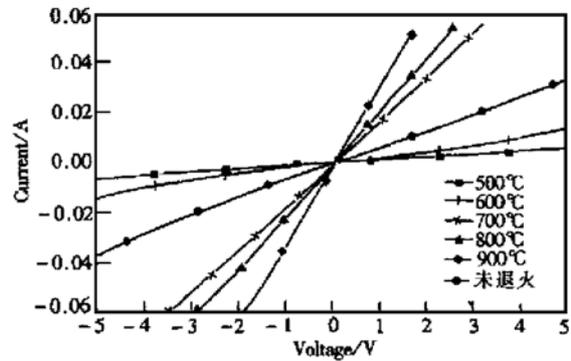


图 2 不同温度下退火后的  $I-V$  曲线

FIG. 2  $I-V$  Curves After Annealing at Various Temperatures

表 1 不同退火温度下的接触电阻及接触电阻率

Table 1  $R_c$  and  $\rho_c$  at Different Annealing Temperatures

退火温度/ $^\circ\text{C}$	$R_c/\Omega$	$\rho_c/(\Omega \cdot \text{cm})$
未退火	63.05	$2.46 \times 10^{-3}$
500	380.90	$8.97 \times 10^{-2}$
600	185.59	$2.13 \times 10^{-2}$
700	18.88	$2.20 \times 10^{-4}$
800	13.94	$1.20 \times 10^{-4}$
900	6.01	$2.20 \times 10^{-5}$

溅射的 Ti/Al/Ti/Au 无需退火即可与 AlGaIn 形成欧姆接触. 这可能是由于 Ti 的功函数低, 且 AlGaIn/GaN 载流子浓度高.  $500^\circ\text{C}$  退火后, 欧姆接触特性变差, 接触电阻反而增加了. 这种增加是由于金属 Ti 与 AlGaIn 中的 Al 之间发生反应生成 Ti-Al 的合金<sup>[7]</sup>使接触势垒增大所致, 而 Ti 与 N 的反应须温度高于  $600^\circ\text{C}$  才能发生, 从而  $n^+$  层还未形成.  $600^\circ\text{C}$  退火后, 接触电阻有所改善.  $700^\circ\text{C}$  退火后, 欧姆接触特性开始好于未退火时,  $800^\circ\text{C}$ 、 $900^\circ\text{C}$  退火后接触电阻进一步降低, 这是由于  $600^\circ\text{C}$  以上时 AlGaIn 中的 N 开始向 Ti 中扩散与 Ti 形成 TiN, 并在 AlGaIn 表层留下 N 空位, 形成  $n^+$  层<sup>[11]</sup>, 从而使电子易于隧穿降低了接触电阻. 快速退火温度越高留在 AlGaIn 中的 N 空位浓度越高, 接触电阻就越低. 由此可见, 以上计算出的  $R_c$  中实际上还包含着  $n^+$  层电阻. 我们还在  $900^\circ\text{C}$  下对样品再次退火 30s, 结果与第一次退火后相同, 说明快速退火 30s 已达到该温度下最佳欧姆接触.

#### 3.2 欧姆接触的温度特性

由于器件可在室温至  $300^\circ\text{C}$  下使用, 因此本实

验就已形成的欧姆接触在室温至 300℃ 间进行了温度特性的测试与分析. 图 3 为 900℃、30s 退火样品被加热至 50、100、150、200、250、300℃ 下停留 20min 后测的  $I-V$  曲线. 随工作温度的升高,  $I-V$  曲线斜率所表征的源漏间电阻增大, 曲线的线性依然保持得很好, 仍为欧姆接触. 图 4 中  $a$  为室温下的  $I-V$  曲线,  $b$  为 300℃ 下恒温 20min 后再回到室温下的  $I-V$

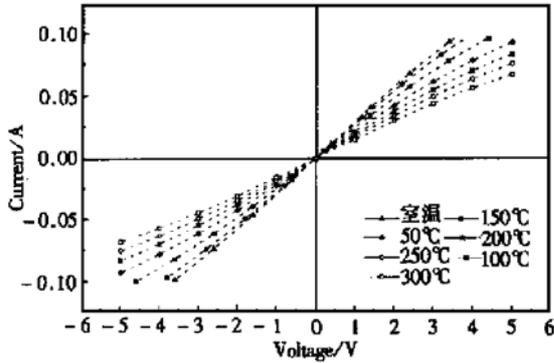


图 3 不同工作温度下的  $I-V$  曲线

FIG. 3  $I-V$  Curve at Various Working Temperatures

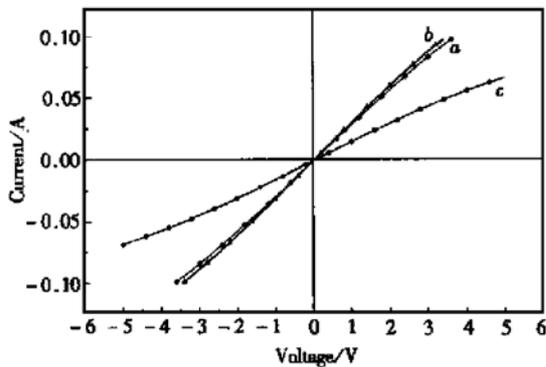


图 4  $a$ : 室温  $I-V$  曲线;  $b$ : 在 300℃ 恒温 20min 后再回到室温下的  $I-V$  曲线;  $c$ : 300℃ 下的  $I-V$  曲线

FIG. 4  $a$ :  $I-V$  Curve at R. T.;  $b$ :  $I-V$  Curve at 300℃ for 20min then Returning to R. T.;  $c$ :  $I-V$  Curve at 300℃

曲线,  $c$  为 300℃ 下的  $I-V$  曲线. 其中,  $a$ 、 $b$  曲线基本上是重合的, 这种微小的差别很可能是由于测量中的误差造成的. 本文对样品由室温升至 300℃ 然后再降回至室温, 升温 and 降温过程中均依次在 50、100、150、200、250、300℃ 下停留 20min 后测其  $I-V$  曲线. 由曲线的斜率计算出相应的电阻, 结果示于图 5, 升温 and 降温曲线也基本上重合. 这说明在不高于 300℃ 温度下工作对金属 Ti/Al/Ti/Au 和 AlGa<sub>N</sub> 之间形成的欧姆接触没有影响, 也不会造成不可恢

复的退化. 从 3.1 节的分析可以看出, 在高于 600℃ 时 N 向 Ti 中的扩散才开始较为明显, 从而 N 空位所造成的  $n^+$  层才开始对金属与 AlGa<sub>N</sub> 间形成欧姆接触做出贡献, 因此在温度不高于 300℃ 时不对已形成的  $n^+$  层造成影响, 而且由于  $\rho_c \approx \exp\left[\frac{4\pi\sqrt{\epsilon m_c \Phi_b}}{h\sqrt{N_D}}\right]$ , 其中与温度有关的只有  $N_D$ , 根据文献[8], 温度对 AlGa<sub>N</sub> 载流子浓度几乎没有影响, 而

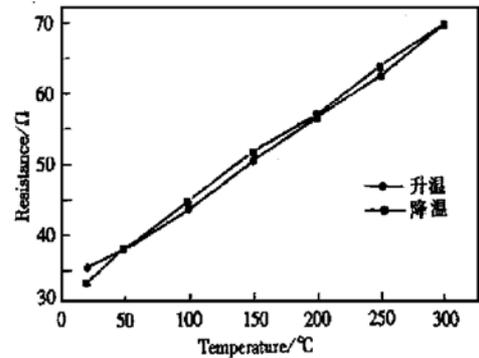


图 5 升温与降温过程中不同温度下的总电阻

FIG. 5 Total Resistance During Temperature Rise and Down

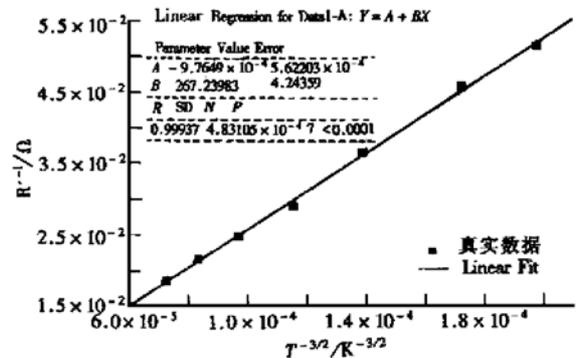


图 6 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 电阻与温度关系拟合曲线

FIG. 6 Fitting Curve of Resistance vs Temperature

迁移率随温度的升高明显下降, 其关系如下:  $\mu \sim T^{-3/2}$ , 也就是说金属与 AlGa<sub>N</sub> 之间的接触电阻几乎不变. 那么,  $I-V$  曲线斜率所表示出电阻的增大应来自于源漏之间 AlGa<sub>N</sub> 薄膜电阻的变化, 即 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 中二维电子气的载流子浓度和迁移率随温度发生了变化. 通过图 3 中的  $I-V$  曲线斜率可以得出不同工作温度下的电阻  $R_T$ , 且  $R_T = 2R_c + R'_T$ ,  $R_c$  不随温度变化, 则不同工作温度下 AlGa<sub>N</sub>/

GaN 薄膜的阻值可由下式计算得到:  $R_{\tau} = R_0 + (R_{\tau} - R_0)$ . 本文就  $1/R_{\tau}$  和  $T^{-3/2}$  做线性模拟, 结果见图 6, 实验值与模拟直线基本上符合, 说明  $1/R_{\tau} - T^{-3/2}$  的关系成立. 由此证实不同工作温度下源漏间电阻的变化是由于 AlGaIn/GaN 迁移率随温度变化造成的, 接触电阻在不高于 300°C 时不随温度而变.

## 4 结论

本文通过快速退火实现了 Ti/Al/Ti/Au 与 AlGaIn 之间良好稳定的欧姆接触. 溅射的 Ti/Al/Ti/Au 与二维电子气载流子浓度为  $2.24 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  的 AlGaIn/GaN 之间在室温下无需退火即可形成欧姆接触, 但接触电阻较大. 退火温度高于 700°C 接触电阻开始降低, 900°C 达到最低. 快速退火时间 30s 已实现最佳欧姆接触. 当工作温度不高于 300°C 时, 接触电阻几乎不受温度的影响.

**致谢** 感谢北京大学物理系 MOCVD 组提供

AlGaIn 材料.

## 参考文献

- [ 1 ] Q. Z. Liu and S. S. Lau, *Solid-State Electronics*, 1998, **42**(5): 677—691.
- [ 2 ] Hacke P., Detchprohm T., Hiramatsu K. and Sawaki N., *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **63**: 2676.
- [ 3 ] Binari S. C., Dietrich H. B., Kelner G., Rowland L. B., Doverspike K. and Gaskill D. K., *Electron. Lett.*, 1994, **30**: 909.
- [ 4 ] Ping A. T., Schmitz A. C., Knan M. A. and Adesida I., *Electron. Lett.*, 1996, **32**: 68.
- [ 5 ] Wang L., Nathan M. I., Lim T. H., Khan M. A. and Chen Q., *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**: 1267.
- [ 6 ] Hirsch M. T., Duxstad K. J. and Hallwe E. E., *Electron. Lett.*, 1997, **33**: 95.
- [ 7 ] Liu Q. Z., Yu L. S., Deng F., Lau S. S., Chen Q. W., Yang J. and Khan M. A., *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**: 1685.
- [ 8 ] I. Daumiller, C. Kirchner, M. Kamp, K. J. Ebeling and E. Kohn, *IEEE Electron Device Letters*, 1999, **20**(9): 448—450.

## Ohmic Contact Performance Between Ti/Al/Ti/Au and AlGaIn

ZHANG Jin-wen, ZHANG Tai-ping, WANG Wei, NING Bao-jun and WU Guo-ying

(*Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China*)

**Abstract:** The performance of Ohmic contact between Ti/Al/Ti/Au deposited by sputtering and n-AlGaIn with carrier density of  $2.24 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  has been studied. It is found that Ohmic contact can be formed between them without any annealing. As the RTA temperature is increasing, the contact resistivity would decrease. 30 second is the optimum RTA time. The work temperature has hardly any influence on the contact resistivity when it is not higher than 300°C.

**Key words:** AlGaIn; Ti/Al/Ti/Au; Ohmic contact

**PACC:** 7340N

**Article ID:** 0253-4177(2001)06-0737-04