

· 光电器件与材料 ·

## AlGa<sub>N</sub> 器件欧姆接触的研究进展

王忆锋, 唐利斌

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

**摘要:** 作为制备光电子器件例如紫外光子探测器、异质结场效应晶体管(HFET)、高电子迁移率晶体管(HEMT)异质结场效应管等的一种宽禁带半导体材料, III-V 族氮化物 AlGa<sub>N</sub> 器件近年来颇受关注. AlGa<sub>N</sub> 与金属之间的低阻欧姆接触的实现问题阻碍了 AlGa<sub>N</sub>(基)器件的发展. 通过对相关文献的归纳分析, 介绍了近年来 AlGa<sub>N</sub> 器件在欧姆接触形成、金属化方案、合金化工艺及表面处理等方面的研究进展.

**关键词:** AlGa<sub>N</sub>; 欧姆接触; 肖特基接触; 紫外探测器; 高电子迁移率晶体管; 异质结场效应晶体管

**中图分类号:** TN304.2<sup>+</sup>3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-1255(2009)01-0036-07

## Developments of Ohmic Contacts of AlGa<sub>N</sub> Devices

WANG Yi-feng, TANG Li-bin

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

**Abstract:** The III-V nitrides AlGa<sub>N</sub> has received a lot of attention recently as one of the important wide band gap semiconductor materials for fabricating optoelectronic components such as ultraviolet photodetectors, heterostructure field effect transistors, and high electron mobility transistors. But difficulties in realizing low-resistance ohmic contacts between metals and AlGa<sub>N</sub> have blocked their developments. By summing and analyzing the related papers published in recent years, the developments of ohmic contact formation, metallization scheme, alloying process and surface treatments for various AlGa<sub>N</sub> devices are presented.

**Key words:** AlGa<sub>N</sub>; ohmic contact; Schottky contact; ultraviolet photodetector; heterostructure field-effect transistor; high electron mobility transistor

AlGa<sub>N</sub>(基)器件是近年来化合物半导体研究的热点之一, 利用其禁带宽度大、电子饱和漂移速度高、导热性能良好等特点, 可以制备紫外探测器等光电子器件, 也可以制备异质结场效应晶体管(HFET)、高电子迁移率晶体管(HEMT)等高频、大功率电子器件. 但无论何种器件, 都需要欧姆接触来实现与外部电路的连接. 制备稳定可靠的低电阻欧姆接触是 AlGa<sub>N</sub> 器件成功应用的关键之一. 从理论上说, 制备良好的欧姆接触, 需要生成一个低势垒, 并且在半导体表面重掺杂. 由于实际工艺条件的限制, 在能带较宽的金属上实现良好的欧姆接触并不

容易, 因此也一直备受研究者关注. 通过对相关文献的归纳分析, 介绍了近年来 AlGa<sub>N</sub> 器件欧姆接触的研究进展.

### 1 欧姆接触研究的一般问题

金属与半导体之间的欧姆接触, 首先需在半导体表面淀积一层金属薄膜, 然后通过适当退火处理形成一个很薄的合金接触区. 这一层合金的品质与器件的工作特性有很大关系. 如何使接触电阻小、轮廓清晰度高、表面光滑、边缘良好以及稳定可靠, 是

收稿日期: 2008-12-05

作者简介: 王忆锋(1963-), 男, 湖南零陵人, 工学士, 高级工程师. 曾赴美国内布拉斯加大学林肯分校计算机系做国家公派访问学者. 目前主要从事器件仿真研究.

欧姆接触研究的主要问题. 目前 AlGa<sub>x</sub>N 器件欧姆接触的研究内容归纳起来大致可以分为 4 个方面, 即接触机理、金属化方案、退火工艺的选择、接触前的表面处理工艺.

比接触电阻率 (specific contact resistivity)  $\rho_c$  是描述金属与半导体材料之间欧姆接触质量的一个重要参数. 对于薄膜材料上的  $\rho_c$  测量, 常用传输线模型 (TLM) 方法<sup>[1-3]</sup>. 基于不同模型的  $\rho_c$  测量方法, 其结果可能有较大差异. 选取准确性和重复性较高的  $\rho_c$  测量方法, 对于正确评价欧姆接触的性能十分重要.

由于材料或操作的原因, 合金接触中常含有氧、碳或其他杂质. 用俄歇电子能谱术 (AES) 进行剖面成分分析可以发现这些问题<sup>[4-7]</sup>, 从而对制作工艺提出改进方向. 此外, 光学显微镜<sup>[8]</sup>、透射电子显微镜 (TEM)<sup>[9-15]</sup>、扫描电子显微镜 (SEM)<sup>[1]</sup>、原子力显微镜 (AFM)<sup>[8,12,16,17]</sup>、高分辨率电子显微镜 (HREM)<sup>[11,18]</sup>、X 射线光电子能谱 (XPS)<sup>[5,6,16,19]</sup>、X 射线衍射<sup>[3,12,18]</sup>、二次离子质谱仪 (SIMS)<sup>[20]</sup>、光学衍射图及计算机模拟<sup>[21]</sup>等也是欧姆接触研究中常用的分析测试手段.

Ti/Al/金属/Au 多层结构是目前 *n* 型 GaN 制备欧姆接触的标准金属化方案<sup>[14]</sup>. 由于 AlGa<sub>x</sub>N 研究的兴起是在 GaN 之后, 因此有关 GaN 的不少研究成果很自然地借鉴到 AlGa<sub>x</sub>N. 但文献<sup>[14]</sup>指出用于 GaN 标准金属化方案工艺不能简单地转移到 AlGa<sub>x</sub>N/GaN 结构.

## 2 Al 组份对 AlGa<sub>x</sub>N 欧姆接触的影响

宽禁带半导体铝镓氮 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N 可以看成是 GaN 和 AlN 的化合物. GaN 是宽禁带材料, AlN 是直接禁带半导体, 两者结合成 AlGa<sub>x</sub>N 固溶体时, 其禁带宽度可按下式计算<sup>[22]</sup>

$$E_g^{\text{AlGa}_x\text{N}} = E_g^{\text{GaN}}(1-x) + E_g^{\text{AlN}}x - bx(1-x) \quad (1)$$

式中,  $E_g^{\text{AlGa}_x\text{N}}$ 、 $E_g^{\text{GaN}}$  和  $E_g^{\text{AlN}}$  分别是 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N、GaN 和 AlN 的禁带宽度,  $x$  为 Al 组份;  $b$  为能带弯曲参数,  $b$  有  $1.3 \pm 0.2$  eV、 $1.0 \pm 0.3$  eV、 $0.68$  eV 及  $0$  eV 等不同数值<sup>[23]</sup>. 随着 Al 组份  $x$  的变化, AlGa<sub>x</sub>N 禁带宽度可以从 GaN 的  $3.4$  eV 连续变化到 AlN 的  $6.2$  eV. 对于日盲型紫外探测器, 相应的组份  $x$  需要达到  $40\%$  以上, 即所谓高铝组份 AlGa<sub>x</sub>N 材料.

文献<sup>[14]</sup>分析了 Al 组份对于欧姆接触形成的

影响, 指出虽然已知 Al 在金属化过程可以降低电阻, 但其机理尚未明晰. 从文献报道的结果来看, 恰当选择多元合金层可以获得低阻欧姆接触, 但实验结果差异较大. 文献<sup>[23]</sup>报道 Ga 面生长的 AlGa<sub>x</sub>N/GaN 异质结界面处自由电子面密度随 Al 组份增加而提高. 文献<sup>[24]</sup>指出, Al 组份的提高将使 AlGa<sub>x</sub>N/GaN HEMT 导带不连续性变大, 极化效应增强; 但同时 Al 组份的提高使 AlGa<sub>x</sub>N 和 GaN 之间的晶格失配扩大, 使应力引发的压电极化电荷密度降低, 器件性能下降.

在较宽能带的金属上低势垒通常难以形成, 故表面重掺杂的半导体必须利用隧道效应的原理形成欧姆接触. 表面掺杂浓度的不均匀会使欧姆单位接触电阻难以达到理论值. 文献<sup>[25]</sup>研究了 Al 组份与 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN HFET 与薄层载流子浓度、电子迁移率、饱和电流等量之间的关系. 电导率是电阻率的倒数. 文献<sup>[26]</sup>报道当 AlN 的摩尔分数从  $0\%$  增加到  $100\%$  (即组份  $x$  从  $0$  变到  $1$ ) 时, *n* 型的 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N ( $x=0 \sim 1$ ) 薄膜电导率的量值在  $10^3 \sim 10^{-2} (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$  之间变化. 随后在 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N 通过电子束蒸发形成 V (15 nm) / Al (80 nm) / V (20 nm) / Au (100 nm) 接触, 并在不同温度下于 N<sub>2</sub> 气氛中快速退火 30 s. 发现当 AlN 的摩尔分数变化直到  $70\%$  时, 所有薄膜的  $\rho_c$  值约为  $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ , 而对于  $95\% \sim 100\%$  的 AlN 摩尔分数,  $\rho_c$  增加到  $0.1 \sim 1 \Omega \cdot \text{cm}^2$ . 文献<sup>[27]</sup>报道在 *n* 型 Al<sub>0.44</sub>Ga<sub>0.56</sub>N 和 *n* 型 Al<sub>0.6</sub>Ga<sub>0.4</sub>N 中, 经过优化的 V/Al/Pt/Au 接触获得的  $\rho_c$  值分别为  $1 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$  和  $4 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ , 优于低铝组份 *n* 型 AlGa<sub>x</sub>N 常用的 Ti/Al/Pt/Au 接触. 文献<sup>[28]</sup>报道, Ti/Al/Ni/Au 在  $800^\circ\text{C}$  的 N<sub>2</sub> 气氛中退火 30 s, 所得  $\rho_c$  值在  $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$  ( $0.2 \sim 3.9 \Omega \cdot \text{mm}$ ) 之间变化; 随着 Al 组份的降低, 平均面电阻值在  $650 \sim 2275 \Omega/\text{cm}^2$  之间变化.

## 3 AlGa<sub>x</sub>N 欧姆接触的材料选择与合金化退火

目前已有多种欧姆接触的金属化方案, 其中, Ti/Al 和 Ti/Al/Ni/Au 是目前使用最多的 2 种多层膜系<sup>[29]</sup>. 当选定接触材料后, 合金化的退火温度和时间关系到在接触界面能否形成高掺杂层, 决定着电接触是否为欧姆接触. 通过升温 - 恒温 - 冷凝实

现的合金化是一个基于温度效应的熔化-化合-扩散-分凝的物理化学过程,用 HREM 可以记录这些过程对表面和界面的影响<sup>[11,18]</sup>.

### 3.1 Ti/Al 欧姆接触

Ti(钛)基金属化方案通过在 AlGa<sub>x</sub>N 表面形成具有低功函数的金属间化合物 TiN 来降低接触电阻. 离散且呈岛状结构的 TiN 沿着线位错不均匀分布. 突起如钉子状的 TiN 穿透 AlGa<sub>x</sub>N 层,在本来是由 AlGa<sub>x</sub>N 势垒层分隔开的二维电子气与金属接触之间形成直接的电连接<sup>[30]</sup>. 文献[1]指出退火后再做制冷处理可以降低 Ti 基欧姆接触的  $\rho_c$  值. SEM 图像表明退火温度、持续时间和处理方式对于样品表面形貌影响不大. 在 Ti 和 Al 膜之间引入 Ta(钽),可以构成 Ti/Ta/Al 欧姆接触<sup>[11]</sup>. 文献[31]利用电流-电压-温度以及  $\rho_c$ -温度关系,研究了 *n* 型 AlGa<sub>x</sub>N 上非合金 Ti 基欧姆接触的载流子输运机制. 结果显示,使用场发射模型及浅施主辅助隧穿模型获得的理论结果与实验数据吻合.

### 3.2 Ti/Al/Ni/Au 欧姆接触

文献[32]报道在 AlGa<sub>x</sub>N/GaN FFET 结构中, Ti/Al/Ni/Au 接触电阻为  $0.2 \Omega \cdot \text{mm}$ ,  $\rho_c$  为  $7.3 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ ,并且具有良好的可生长性及出色的边缘定义. 文献[33]报道经优化, AlGa<sub>x</sub>N/GaN HEMT 器件 Ti/Al/Ni/Au 欧姆接触的  $\rho_c$  可达  $10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ . 文献[10]指出,在 Ti/Al/Ni/Au 金属层下面插入一层 30Å 厚的 Si 层,形成的 Si/Ti/Al/Ni/Au 可以提高接触性能. 文献[12]指出,退火时反应层中形成的不同物相的结构和电子性质对于纳米尺度的电流输运有着关键影响. Ti/Al/Ni/Au 在退火过程中形成的主要物相为 AlNi、AlAu<sub>4</sub> 和 Al<sub>2</sub>Au,其中 Al<sub>2</sub>Au 低电阻率为电流流过接触提供了占优势的导电通道. 文献[4]提出一种用于 AlGa<sub>x</sub>N/GaN 异质结的 Nb/Ti/Al/Ni/Au 金属化方案,即在沉积常规的 Ti/Al/Ni/Au 之前,先沉积一层 Nb(铌)作为接触的首层. 分析表明 Nb 基欧姆接触的表面形貌及  $\rho_c$  值优于常规的 Ti/Al/Ni/Au 金属化方案. 另外,文献[18]报道,在 700℃ 退火 1 min, AlGa<sub>x</sub>N/GaN HFET 的 Ta/Ti/Al/Ni/Au 欧姆接触的  $\rho_c$  为  $7.5 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ ,分析表明在金属和 AlGa<sub>x</sub>N 层之间的界面形成了氮物相,并且 Ta 基接触的表面形貌优于 Ti/Al/Ni/Au 金属化方案中的表面形貌. 较厚的

TaN/TiN 界面层的出现有益于 Ta/Ti/Al/Ni/Au 金属化方案中获得良好的欧姆接触性能.

### 3.3 Ti/Al/Ti/Au 欧姆接触

文献[7]报道了对 2 种不同厚度 Ti/Al/Ti/Au 欧姆接触金属化方案的研究结果,其中方案 A 的各膜层厚度分别为 20 nm/100 nm/45 nm/55 nm,方案 B 的膜层厚度分别为 30 nm/80 nm/120 nm/55 nm. 结果表明,方案 A 可以在较短的退火时间内形成具有良好质量的欧姆接触;方案 B 需要的退火时间较长,对于具有较大晶粒的 AlGa<sub>x</sub>N/GaN 材料,接触电阻较高. 文献[8]报道,在 SiC 衬底及宝石(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)衬底上生长 AlGa<sub>x</sub>N/GaN 结构,然后分别制备 Ti/Al/Ti/Au 欧姆接触,发现 SiC 上接触电阻值高于宝石衬底上的电阻值.

文献[2]报道,在高 Al 组份 *n* 型 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N ( $x \geq 0.45$ ) 材料上溅射生长 Ti/Al/Ti/Au 欧姆接触,由传输线模型方法测试得  $\rho_c$  为  $4.9 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}^2$ .

### 3.4 Ni/Al 欧姆接触

对于 *n* 型 AlGa<sub>x</sub>N,金属间化合物 NiAl (50% : 50%) 可构成低阻欧姆接触. 文献[21]指出,在 900℃ 下退火 5 min 后, *n* 型 Al<sub>0.12</sub>Ga<sub>0.88</sub>N 和 *n* 型 Al<sub>0.18</sub>Ga<sub>0.82</sub>N 上 Ni/Al 接触的  $\rho_c$  分别为  $2.1 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$  和  $4.7 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ . 此外,对这些接触在 600℃ 下做 100 h 的长时间退火, *n* 型 Al<sub>0.12</sub>Ga<sub>0.88</sub>N 的  $\rho_c$  衰减不大,仅从  $4.7 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$  变到  $9.2 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ . 这些结果表明, NiAl 很有潜力成为一种稳定的低阻接触,这一点对于在较高温度应用下的 *n* 型 AlGa<sub>x</sub>N 很有吸引力.

### 3.5 Ti/Al/Mo/Au 欧姆接触

文献[8]报道,在 SiC 衬底及宝石衬底上生长 AlGa<sub>x</sub>N/GaN 结构,然后分别制备 Ti/Al/Mo/Au 欧姆接触,发现 SiC 上接触电阻值高于宝石衬底上的电阻值. 文献[20]报道, AlGa<sub>x</sub>N/GaN 上的 Ti/Al/Mo/Au 接触中的 Mo(钼)层直到 700℃ 时一直保持连续,超过 700℃ 时开始分解为颗粒,嵌入到金属基体; Ti/Al/Mo/Au 在 850℃ 时可以获得最优接触性能. 这与沿着位错形成的 TiN 岛状结构穿透二维电子气平面进入异质结有关. TiN 岛状结构形貌与线

位错之间存在某种相关性. TiN 岛状结构占据了大部分与二维电子气接触的面积, 又因为不需要通过 AlGaIn 的电子隧穿, 故可获得低阻欧姆接触.

AlGaIn 材料可以通过掺杂转为  $p$  型. Mg 是目前最适合的  $p$  型掺杂元素<sup>[22]</sup>. 相比之下,  $p$  型 AlGaIn 材料欧姆接触的难度较大. 对  $p$  型材料需用功函数更高的金属来形成低势垒接触, 但实际的金属最高功函数没有超过 6 eV 的, 只能选用 Pt(铂)、Pd(钯)、Ni、Au 等高功函数金属, 其中 Ni/Au 是常见的双层研究体系. 文献[34]报道了 Mg 掺杂  $p$  型  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{GaN}$  超晶格 Ni/Au 欧姆接触的性能. 在热处理前 Ni/Au 接触呈现为整流性的 IV 特征, 热处理后当温度增到 600 °C 时, IV 曲线呈现欧姆接触的特征.  $\text{N}_2$  气氛下在 650 °C 退火 5 min,  $\rho_c$  值可达  $4.0 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ . 文献[35]报道在 Ti/Al 接触中加入少量 Pd 或 Pt 可以降低电阻. 在 Si 掺杂  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$  上制备的 Ti(20 nm)/Pd(5 nm)/Al(200 nm) 接触经 600 °C 的  $\text{N}_2$  气氛下退火, 其最小  $\rho_c$  值为  $1.6 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ . 文献[16]报道对于在 Mg 掺杂 AlGaIn 上制备的 Pd/Ni/Pd/Ru 欧姆接触, 在 600 °C 的  $\text{N}_2$  气氛中退火 1 min 后, 这些接触变为欧姆接触,  $\rho_c$  值为  $(1.4 \pm 0.3) \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ ; 在 600 °C 退火 60 min, 样品的  $\rho_c$  值和表面粗糙度也没有显著退化.

Ti/Al/Pt/Au 是低铝组份  $n$  型 AlGaIn 常用的接触<sup>[27]</sup>. 文献[5]研究了影响 AlGaIn/GaN 异质结 Ti/Al/Pt/Au 接触质量的各种因素. 文献[3]报道在 Si 调制掺杂  $n$  型  $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$  异质结上制备的 Ti/Al/Pt/Au 接触获得的  $\rho_c$  值为  $1.6 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ .

为了使  $p$  型 AlGaIn 的欧姆接触容易实现, 还可以在  $p$  型 AlGaIn 上制作  $p$ -GaIn 做帽层作为与金属电极的接触层. 文献[36]介绍了一种使用等离子体辅助分子束外延, 通过再生长  $n^+$ -GaIn 层来实现非合金欧姆接触的方法. 指出高掺杂 GaIn 层的再生长对于在 HEMT 结构中获得低阻非合金欧姆接触具有重要作用.

### 3.6 V/Al/V/Ag 欧姆接触

文献[9]报道对于  $n$  型  $\text{Al}_{0.58}\text{Ga}_{0.42}\text{N}$ , 在 875 °C 退火 60 s 后, V/Al/V/Ag 接触的  $\rho_c$  为  $(2.4 \pm 0.3) \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ . 改变金属化过程的处理条件及金属

层厚度时,  $\rho_c$  及形貌的变化较为有限. 对每种材料所做的 TEM 分析表明, 半导体与金属化过程之间的反应是有限的, 界面的大部分被含 Ag 微粒为主的混合物所接触. 测量了  $\rho_c$  与温度之间的函数关系, 表明在  $n$  型  $\text{Al}_{0.58}\text{Ga}_{0.42}\text{N}$  的低电阻欧姆接触中, 场发射是主要的电流输运机制.

### 3.7 肖特基接触

金属与半导体之间的接触除了欧姆接触, 还包括肖特基接触. 两者均是先在半导体表面淀积一层金属薄膜, 然后通过适当退火处理形成一个很薄的合金接触区. 文献[20]报道在  $\sim 500$  °C 左右, AlGaIn/GaN 材料的 Ti/Al/Mo/Au 接触发生从肖特基接触到欧姆接触的转变. 文献[37]指出, 对于非掺杂  $\text{Al}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{N}$  材料, Ir(铱)比 Pt 更适合制备肖特基接触. 文献[38]报道了具有 Ni 肖特基接触的 AlGaIn 基的金属-半导体-金属 MSM 光子探测器, 介绍了在不同退火温度(300~700 °C)下接触的热稳定性及热处理后的制冷对于器件电性能的影响.

可以利用具有纤锌矿结构的 GaIn、AlN 极强的压电极化效应改变肖特基结的势垒高度<sup>[22,23]</sup>. AlGaIn/GaN HEMT 异质界面处的 2DEG 是决定器件特性的关键. 文献[39]指出当欧姆接触金属接近肖特基接触金属时, 极化效应被削弱, 沟道中的二维电子气薄层载流子浓度降低. 文献[40]报道了  $n$  型  $\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}$  的 Ga 面上制备的 Ni 肖特基接触的势垒高度与压应力之间的函数关系, 认为势垒高度的改变是压电效应和能带结构共同作用的结果. 文献[41]指出, 由于 AlGaIn 势垒, 在  $n^+$ -GaIn/AlGaIn/GaN HEMT Ga 面上的非合金欧姆接触对于二维电子气有着显著的电阻. 对于在 N 面上生长和 HEMT 结构, 由于来自接触的电子可以不需要经过 AlGaIn 层与二维电子气沟通, 不经接触退火即获得  $5.5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$  ( $0.2 \Omega \cdot \text{mm}$ ) 的  $\rho_c$  值.

## 4 接触前的表面处理工艺

AlGaIn 表面活跃, 在制备过程中, 容易受到水气、氧等杂质的沾污. 接触金属会和半导体表面反应形成具有新电学性质的复合物. 界面处一层污染层会非常有效地增加势垒宽度. 文献[5]研究了影响 AlGaIn/GaN 异质结 Ti/Al/Pt/Au 接触质量的各种因素. 文献[42]报道, 痕量水气对 AlGaIn/GaN

HEMT 欧姆接触的形成有着显著影响. 由于欧姆接触接触退火需要较高的温度, 因此与 AlGaAs/GaAs HEMT 或 InP 基 HEMT 相比, 这是一个影响较大的问题. 在快速退火过程中, 使用温度稍高于环境温度的冷却水似乎为最佳方案.

表面清洗是目前常用的表面处理技术之一, 它通过物理作用及化学反应破坏沾污物质与表面的作用力, 以有效去除表面氧化物, 降低表面态密度. 除了表面清洗之外, 等离子体处理也是目前常用的一种表面处理技术. 文献[17]报道了有机溶剂清洗、酸溶液清洗、经过缓冲的氧化刻蚀 (buffered oxide etch, BOE)、等离子体清洗、快速退火等各种表面清洗方法对于 AlGaN/GaN HEMT 的影响, 介绍了 3 种可降低表面碳、氧成份的处理方法. 文献[6]报道了先用四氯化硅 ( $\text{SiCl}_4$ ) 反应离子刻蚀 (reactive-ion-etching, RIE) 处理  $n$  型  $\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{N}$  表面, 再分别用氢氧化铵 ( $\text{NH}_4\text{OH}$ )、盐酸 ( $\text{HCl}$ ) 和 BOE 溶液清洁表面的结果. 发现对于样品表面上氧化物的去除, BOE 是最有效的处理方式. 文献[43]报道, Ti/Al/Ti/Au 接触先用 BOE、再用二氟二氯化碳 ( $\text{CCl}_2\text{F}_2$ ) 等离子体处理,  $900\text{ }^\circ\text{C}$  下在  $\text{N}_2$  气氛中快速退火 30 s, 获得  $\rho_c$  值为  $5.85 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$  ( $0.5 \Omega \cdot \text{mm}$ ), 并且具有很好的边缘锐度.

等离子体处理可使  $n$  型 AlGaN 的肖特基势垒高度降低, 有助于形成欧姆接触. 文献[19, 20]报道了使用氯气/三氯化硼 ( $\text{Cl}_2/\text{BCl}_3$ ) 和 Ar (氩) 电感耦合等离子体, 对  $n$  型  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $x = 0.1 \sim 0.5$ ) 上的 Pt/Au 接触、Ti/Al/Ti/Au 接触做表面处理的效果. 等离子体处理提高了  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  表面的导电率, 使得整流接触变为欧姆接触. 经过  $900 \sim 1000\text{ }^\circ\text{C}$  退火后,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $x = 0 \sim 0.3$ ) 上的 Ti/Al/Ti/Au 多层膜变为欧姆接触, 其  $\rho_c$  值为  $(3 \sim 7) \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ . 文献[44]介绍了 Ti/Al/Mo/Au 接触形成过程中, 等离子体处理条件与 IV 线性、电流强度以及接触性能之间的关系. 文献[45]研究了 AlGaN/GaN Ti/Al/Pt/Au 欧姆接触与等离子体曝光条件之间的函数关系. 电感耦合等离子体  $\text{N}_2$  放电可在 AlGaN/GaN 结构的近表面区域创建一个缺氮区域. 在适度的离子束流 ( $\sim 4 \times 10^{16} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ) 和较低的离子能量 ( $125 \text{ eV}$ ) 下, 没有观察到 AlGaN 表面粗糙. 在最优化的条件下, 离子体处理使欧姆接触电阻量值降低了约 2/3.

但是, 等离子体对于欧姆接触的制备也有不利影

响. 例如,  $\text{Cl}_2/\text{BCl}_3$  和 Ar 电感耦合等离子体降低了  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $x \geq 0.3$ ) 的表面掺杂浓度, 使 Pt/Au、Ti/Al/Ti/Au 接触性能退化<sup>[20]</sup>. 实际情况下, 由于半导体的表面存在大量表面能级, 当半导体和金属接触时, 其势垒高度和金属脱出功无关, 即所谓费米能级的钉扎效应. 文献[19]指出用等离子体对 Ti/Al/Ti/Au 接触做表面处理, 钉扎效应使得  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$  中的费米能级被等离子体导入的深能级状态所固定, 这意味着对于 AlGaN 基的紫外探测器, 有必要减轻在台面刻蚀阶段所引入的等离子体损伤.

AlGaN 表面容易氧化, 形成很高的表面态密度, 导致费米能级钉扎和非辐射复合中心增加, 影响器件的电学和光学性能. 表面纯化是解决此问题的途径之一. 文献[15]指出, 对 AlGaN/GaN HEMT 的 Au/Mo/Al/Ti 接触用  $\text{Si}_3\text{N}_4$  原位钝化可以改善电性能. 文献[46]报道, 在 AlGaN/GaN HEMT 上原位淀积  $\text{Si}_3\text{N}_4$  钝化层可以减少 AlGaN 层的粗糙度.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  具有高质量的化学计量比, 可以使 AlGaN 界面顶层的电荷中性化, 从而可以获得较高的二维电子气密度. 此外它还可以在处理过程中起到保护表面的作用.

## 5 结 束 语

AlGaN 和金属间欧姆接触的制备是一个工艺性、实践性很强的课题. 其形成与具体制备途径的物理或化学过程紧密相关. 为了实现良好的欧姆接触, 国内外研究者采取了各种方法并获得了许多成果, 但仍存在一些问题, 如接触机理、实现工艺、表面处理对二维电子气的影响、欧姆接触的可靠性、重复性等, 需要进一步深入的理论研究及大量的实践检验.

## 参 考 文 献

- [1] Zainuriah Hassan, Fong Kwong Yam, Yan Cheung Lee, et al. Effects of post annealing treatments on the characteristics of ohmic contacts on n-type AlGaN[J]. SPIE, 2005, 5739: 169.
- [2] 王玲, 许金通, 陈俊, 等. 高 Al 组份  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  材料的欧姆接触[J]. 激光与红外, 2007, 37(z1): 967-970.
- [3] B Shen, H M Zhou, J Liu, et al. Ohmic contact and interfacial reaction of Ti/Al/Pt/Au metallic multi-layers on  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  heterostructures[J]. Optical Materials, 2003, 23(1/2): 197-201.

- [4] G Vanko, T Lalinský, Ž. Mozolová, et al. Nb-Ti/Al/Ni/Au based ohmic contacts to AlGaN/GaN[J]. Vacuum, 2007, 82(2):193–196.
- [5] S Kaciulis, L Pandolfi, S Viticoli, et al. Characterization of Ohmic contacts on GaN/AlGaN heterostructures[J]. Applied Surface Science, 2006, 253(3):1055–1064.
- [6] Deepak Selvanathan, Fitih M Mohammed, Jeong-Oun Bae, et al. Investigation of surface treatment schemes on *n*-type GaN and Al<sub>0.20</sub>Ga<sub>0.80</sub>N [J]. Journal of Vacuum Science Technology B, 2005, 23(6):2538–2544.
- [7] J A Bardwell, G I Sproule, Y Liu, et al. Comparison of two different Ti/Al/Ti/Au ohmic metallization schemes for AlGaN/GaN[J]. Journal of Vacuum Science Technology B, 2002, 20(4):1444–1447.
- [8] Alexei Vertiatchikh, Ed Kaminsky, Julie Teetsov, et al. Structural properties of alloyed Ti/Al/Ti/Au and Ti/Al/Mo/Au ohmic contacts to AlGaN/GaN[J]. Solid-State Electronics, 2006(7/8):1425–1429.
- [9] M A Miller, S-K Lin, S E Mohny. V/Al/V/Ag contacts to *n*-GaN and *n*-AlGaN [J]. Journal of Applied Physics, 2008, 104(6):4508.
- [10] Vincent Desmaris, Jin-Yu Shiu, Chung-Yu Lu, et al. Transmission electron microscopy assessment of the Si enhancement of Ti/Al/Ni/Au Ohmic contacts to undoped AlGaN/GaN heterostructures [J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(3):4904.
- [11] S-H Lim, W Swider, J Washburn, et al. Structural analysis of interfacial layers in Ti/Ta/Al ohmic contacts to *n*-AlGaN[J]. Journal of Applied Physics, 2000, 88(11):6364.
- [12] F Roccaforte, F Iucolano, F Giannazzo, et al. Nanoscale carrier transport in Ti/Al/Ni/Au Ohmic contacts on AlGaN epilayers grown on Si(111)[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(2):2103.
- [13] Liang Wang, Fitih M Mohammed, Ilesanmi Adesida. Dislocation-induced nonuniform interfacial reactions of Ti/Al/Mo/Au ohmic contacts on AlGaN/GaN heterostructure[J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(14):1915.
- [14] B Van Daele, G Van Tendeloo, W Ruythooren, et al. The role of Al on Ohmic contact formation on *n*-type GaN and AlGaN/GaN [J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(6):1905.
- [15] B Van Daele, G Van Tendeloo, J Derluyn, et al. Mechanism for Ohmic contact formation on Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> passivated AlGaN/GaN high-electron-mobility transistors [J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(20):1908.
- [16] Ja-Soon Jang, Tae-Yeon Seong, Seong-Ran Jeon. Formation mechanisms of low-resistance and thermally stable Pd/Ni/Pd/Ru Ohmic contacts to Mg-doped Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>N [J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(9):2129.
- [17] Fernando González-Posada, Jennifer A Bardwell, Simona Moisa, et al. Surface cleaning and preparation in AlGaN/GaN-based HEMT processing as assessed by X-ray photoelectron spectroscopy [J]. Applied Surface Science, 2007, 253(14):6185–6190.
- [18] Ki Hong Kim, Chang Min Jeon, Sang Ho Oh, et al. Investigation of Ta/Ti/Al/Ni/Au ohmic contact to AlGaN/GaN heterostructure field-effect transistor [J]. Journal of Vacuum Science Technology B, 2005, 23(1):322–326.
- [19] X A Cao, H Piao, S F LeBoeuf, et al. Effects of plasma treatment on the Ohmic characteristics of Ti/Al/Ti/Au contacts to *n*-AlGaN [J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(8):2109.
- [20] Liang Wang, Fitih M Mohammed, Ilesanmi Adesida. Formation mechanism of Ohmic contacts on AlGaN/GaN heterostructure: Electrical and microstructural characterizations[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(9):3516.
- [21] D B Ingerly, Y Chen, R S William, et al. Low resistance ohmic contacts to *n*-GaN and *n*-AlGaN using NiAl [J]. Applied Physics Letters, 2000, 77(3):82.
- [22] 虞丽生. 半导体异质结物理[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2006.
- [23] 李娜, 赵德刚, 杨辉. AlGaN/GaN 异质结中极化效应的模拟[J]. 中国科学 G 辑: 物理学、力学、天文学, 2004, 34(4): 422–429.
- [24] 杨燕, 郝跃, 张进城, 等. AlGaN 势垒层应变弛豫度对高 Al 含量 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN HEMT 性能的影响[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2006, 36(9): 925–932.
- [25] W S Chen, S J Chang, Y K Su, et al. Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN heterostructure field effect transistors with various Al mole fractions in AlGaN barrier[J]. Journal of Crystal Growth, 2005, 275(3/4):398–403.
- [26] Ryan France, Tao Xu, Papo Chen, et al. Vanadium-based Ohmic contacts to *n*-AlGaN in the entire alloy composition[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(6):115.
- [27] E D Readinger, S E Mohny, T G Pribicko, et al. Ohmic contacts to Al-rich *n*-AlGaN [J]. Electronics Letters, 2002, 38(20):1230–1231.
- [28] G H Jessen, B D White, S T Bradley, et al. Ohmic con-

- tact characterization of AlGaIn/GaN device layers with spatially localized LEEN spectroscopy [J]. Solid-State Electronics, 2002, 46(9):1427 - 1431.
- [29] A Soltani, A BenMoussa, S Touati, et al. Development and analysis of low resistance ohmic contact to *n*-AlGaIn/GaN HEMT[J]. Diamond & Related Materials, 2007, 16(27):262 - 266.
- [30] Liang Wang, Fitihi M Mohammed, Ilesanmi Adesida. Differences in the reaction kinetics and contact formation mechanisms of annealed Ti/Al/Mo/Au Ohmic contacts on *n*-GaIn and AlGaIn/GaN epilayers [J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(1):3702.
- [31] Ja-Soon Jang, Tae-Yeon Seong, Seong-Ran Jeon. Electronic transport mechanism for nonalloyed Ti-based Ohmic contacts to *n*-AlGaIn [J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(4):6106.
- [32] B Jacobs, M C J C M Kramer, E J Geluk, et al. Optimisation of the Ti/Al/Ni/Au ohmic contact on AlGaIn/GaN FET structures[J]. Journal of Crystal Growth, 2002, 241(1/2):15 - 18.
- [33] 刘键, 李诚瞻, 魏珂, 等. 具有低欧姆接触电阻的高性能 AlGaIn/GaN HEMT 器件研制[J]. 半导体学报, 2006, 27(z1):262 - 265.
- [34] C H Kuo, J K Sheu, G C Chi, et al. Low-resistance Ni/Au ohmic contact to Mg-doped of  $Al_{0.15}Ga_{0.85}N/GaN$  superlattices[J]. Solid-State Electronics, 2001, 45(5):717 - 720.
- [35] S Murai, H Masuda, Y Koide, Masanori Murakami. Effect of Pd or Pt addition to Ti/Al ohmic contact materials for *n*-type AlGaIn[J]. Appl. Phys. Lett, 2002, 80(16):2934.
- [36] Hui-Chan Seo, Patrick Chapman, Hyun-Ick Cho, et al. Ti-based nonalloyed Ohmic contacts for  $Al_{0.15}Ga_{0.85}N/GaN$  high electron mobility transistors using regrown *n*<sup>+</sup>-GaIn by plasma assisted molecular beam epitaxy[J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(10):2102.
- [37] Y Guhel, B Boudart, E Delos, et al. Comparative studies of Pt and Ir schottky contacts on undoped  $Al_{0.36}Ga_{0.64}N$  [J]. Microelectronics and Reliability, 2006, 46(5/6):786 - 793.
- [38] Kamarulazizi Ibrahim, Ali A Aljubouri, Yan C. Lee, et al. Thermal stability of contacts on AlGaIn-Based UV photodetectors[J]. SPIE, 2004, 5353:151.
- [39] Zhaojun Lin, Wu Lu, Jaesun Lee, et al. Influence of annealed ohmic contact metals on polarisation of AlGaIn barrier layer [J]. Electronics Letters, 2003, 39(19):1412 - 1414.
- [40] Y Liu, M Z Kauser, P P Ruden, et al. Effect of hydrostatic pressure on the barrier height of Ni Schottky contacts on *n*-AlGaIn[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(2):2109.
- [41] Man Hoi Wong, Yi Pei, Tomás Palacios, et al. Low nonalloyed Ohmic contact resistance to nitride high electron mobility transistors using N-face growth[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(23):2103.
- [42] W S Lau, W T Wong, Joy B H Tan, et al. Effect of a trace of water vapor on Ohmic contact formation for AlGaIn/GaN epitaxial wafers [J]. Microelectronics Reliability, 2008, 48(5):794 - 797.
- [43] X J Zhou, K Qiu, C J Ji, et al. Low-resistance Ohmic contact on undoped AlGaIn/GaN heterostructure with surface treatment using  $CCl_2F_2$  reactive ion etching[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(10):3511.
- [44] Liang Wang, Fitihi M Mohammed, Benedict Ofoonye, et al. Ohmic contacts to *n*<sup>+</sup>-GaIn capped AlGaIn/AlN/GaN high electron mobility transistors [J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(1):2113.
- [45] A P Zhang, G T Dang, F Ren, et al. Effect of  $N_2$  discharge treatment on AlGaIn/GaN high electron mobility transistor ohmic contacts using inductively coupled plasma [J]. Journal of Vacuum Science Technology A, 2000, 18(4):1149 - 1152.
- [46] J Derluyn, S Boeykens, K Cheng, et al. Improvement of AlGaIn/GaN high electron mobility transistor structures by in situ deposition of a  $Si_3N_4$  surface layer[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 98(5):4501.

## 简讯

### 海军开发红外敌方火力指示系统

美国海军正在寻求红外传感器技术帮助直升机防御小型武器、反飞机火炮(AAA)和助推火箭弹(RPG)的攻击。

位于华盛顿的海军研究室的科学家计划在 2009 年下半年演示一个样机系统。这个样机系统能提供对便携面-空和空-空威胁的实时告警并能向机组人员显示中波红外成像，

以提高其在能见度差的情况下的态势感知能力。

样机系统测试将于 2009 年 11 月在美国马里兰州阿伯丁市的美国陆军试验场地进行,所需设备将由距地面 100 ft 的吊车安装到平台上。

(于艳梅提供)