

# WN<sub>x</sub>/n-GaAs 肖特基势垒特性\*

张利春 高玉芝 宁宝俊 方克微

(北京大学微电子学研究所)

汪锁发 柴淑敏

(中国科学院微电子中心,北京)

1989年6月28日收到

本文用俄歇能谱、卢瑟福背散射、电流-电压和电容-电压等方法研究了射频磁控反应溅射制备的 WN<sub>x</sub>/n-GaAs 肖特基势垒特性。结果表明,经 800°C 快速热退火后,WN<sub>x</sub>/n-GaAs 势垒具有良好的整流特性和高温稳定性,其势垒高度为 0.79eV,理想因子为 1.19。在自对准 GaAs MESFET 工艺中,WN<sub>x</sub> 是一种好的栅材料。

主题词 反应溅射,氮化钨,砷化镓,肖特基势垒,自对准 GaAs MESFETs

## 一、引言

自对准耐高温栅 GaAs MESFET 工艺具有工艺简单,制作的器件性能好的优点,并且有利于制造 GaAs 大规模集成电路。但是这种工艺要求栅材料能经受高温退火以及与 GaAs 衬底具有良好的肖特基势垒特性。我们已经报道了几种难熔金属氮化物与 GaAs 肖特基势垒特性<sup>[1-4]</sup>。本文用俄歇能谱、卢瑟福背散射、电流-电压和电容-电压等方法,研究了射频磁控反应溅射制备的 WN<sub>x</sub>/n-GaAs 肖特基势垒特性。

## 二、样品制备

实验采用了两种样品:(100)取向、掺硅浓度为  $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  的 n 型 GaAs 片和热生长了 5000 Å SiO<sub>2</sub> 层的硅片作为衬底,硅片样品用来分析 WN<sub>x</sub> 薄膜特性。WN<sub>x</sub> 薄膜淀积前,样品进行了严格去油和清洁处理。WN<sub>x</sub> 薄膜采用了射频磁控溅射系统淀积。溅射系统本底真空度为  $5 \times 10^{-7}$ — $1 \times 10^{-6}$  托,反应溅射功率密度为  $3.8 \text{ W/cm}^2$ 。溅射气体中氮的流量比  $r = \frac{\text{N}_2}{\text{Ar} + \text{N}_2}$  在 3—30% 范围内变化。溅射过程中衬底温度为 100°C,系统总压力为 5 毫托。用标准的正胶光刻工艺和反应离子刻蚀方法制备 WN<sub>x</sub> 薄膜图形。样品的正反面及四周用 PECVD 的 SiO<sub>2</sub> 作包封材料。然后用卤素灯快速热退

\* 国家自然科学基金资助项目。

火装置进行热退火, 退火温度范围为 500—800℃, 退火时间为 10 秒。退火以后用反应离子刻蚀去除样品背面的  $\text{SiO}_2$  层, 蒸 Au-Ge 合金并经 450℃、1 分钟合金化形成欧姆接触。

### 三、结果和分析

$WN_x$  薄膜是以高纯钨(99.9%)为靶, 在氮、氩混合气氛中经反应溅射而成。经显微镜观察,  $WN_x$  薄膜表面光滑致密呈微黄色。这种薄膜在主要的几种强酸中均不易被腐蚀, 是一种化学性能稳定的材料。我们采用反应离子刻蚀(RIE)方法在  $\text{SF}_6 + \text{O}_2$  气氛中成功地刻蚀了  $WN_x$  薄膜。当反应离子刻蚀功率为 100W 时,  $WN_x$  薄膜的平均腐蚀速率为 800 Å/分。

$WN_x$  薄膜与所采用的溅射气氛有关。经俄歇能谱(AES)分析表明, 当氮气流量比  $\gamma = 3\%$  时,  $WN_x$  薄膜中 N/W 原子比约为 23%; 当  $\gamma = 10\%$  时, 相应的 N/W 原子比为 27.5%; 当  $\gamma = 30\%$  时, 则  $WN_x$  薄膜中的 N/W 原子比增为 36%。表明  $WN_x$  薄膜中 N/W 原子比随着溅射气氛中氮气流量比的增加而增加。图 1 给出了  $WN_x$  薄膜的电阻率与薄膜中 N/W 原子比关系曲线。由图可以看出,  $WN_x$  薄膜中含氮量大, 则相应的  $WN_x$  薄膜的电阻率值高。用 X 射线衍射技术对  $WN_x$  薄膜 800℃ 退火前后的晶体结构进行了分析。结果表明,  $WN_x$  薄膜退火前后均为多晶结构, 但是对应不同的  $\gamma$  值有不同的相组成。当  $\gamma$  在 3—10% 范围时, 薄膜主要由  $W_2N$ ,  $WN$  和没有反应的纯 W

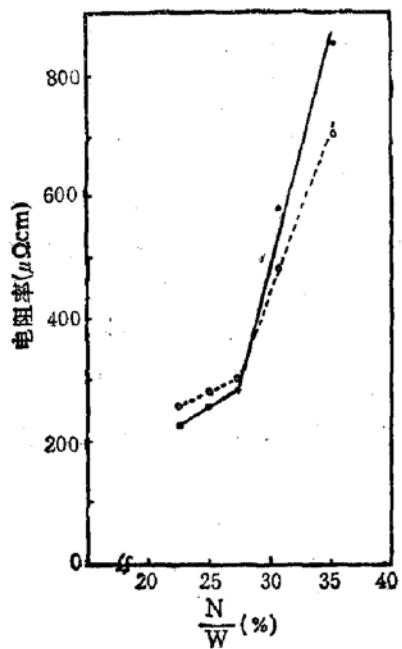


图 1  $WN_x$  薄膜电阻率与薄膜中 N/W 原子比关系曲线  
—●—退火前 —○—800°C 退火后

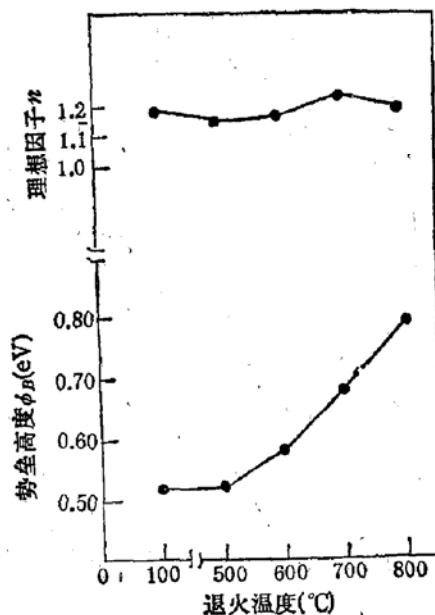


图 2  $WN_x/n\text{-GaAs}$  肖特基接触的势垒高度  $\phi_B$  和理想因子  $n$  与退火温度的关系  
 $\gamma = 3\%$

相混合组成。经 800℃ 快速热退火后, 薄膜中发生了相转变, 仅仅存有  $W_2N$  相。但当  $\gamma \geq 20\%$  时, 刚沉积的薄膜中已不存在纯 W 相, 而由  $WN$  和  $W_2N$  相构成。800℃ 退

火后，薄膜仍由  $WN_x$  相和  $W_2N$  相组成，但以  $W_2N$  相为主。相应的  $WN_x$  薄膜的反射式电子衍射结果表明，退火前后薄膜的衍射图象呈现明显的多晶环，说明均为多晶结构。该结果与 X 射线衍射结果相符。我们还研究了 800°C 退火前后的  $WN_x$  薄膜电阻率变化，结果如图 1 所示。由图可以看出，退火前后  $WN_x$  薄膜的电阻率变化大致可分为二个区段：低 N/W 原子比区段，800°C 退火后，薄膜的电阻率略有增大，而高 N/W 原子比区段，则薄膜电阻率有所下降。这可能与薄膜相结构变化有关，低 N/W 原子比的  $WN_x$  薄膜经 800°C 退火后，薄膜中  $W_2N$  相增加，且不再含有 W 相，从而会使薄膜电阻率增大；而高 N/W 原子比区段， $WN_x$  薄膜退火后虽然仍由  $WN$  相和  $W_2N$  相组成，但已发生以  $W_2N$  相为主的变化，且晶粒长大，所以导致薄膜电阻率下降。

我们用电流-电压方法表征肖特基势垒特性，其中势垒高度和理想因子是两个重要参数。图 2 给出了经不同温度快速热退火的  $WN_x/n\text{-GaAs}$  肖特基势垒二极管的势垒高度  $\phi_B$  和理想因子  $n$  的关系曲线。刚沉淀和 500°C 退火的势垒高度没有变化，均为 0.52 eV，理想因子分别为 1.19 和 1.15。经 600°C 和 700°C 热退火后，其势垒高度变化呈上升趋势，分别为 0.58 eV 和 0.68 eV。当退火温度为 800°C 时，相应的势垒高度增大到 0.79 eV，理想因子为 1.19，这个结果与文献[5, 6]的结果是基本一致的。同时还可以看到，随着退火温度的升高， $WN_x/n\text{-GaAs}$  肖特基势垒二极管电流特性有很大改善。即当退火温度从 500°C 增高到 800°C 时，肖特基二极管的反向饱和电流差不多减小了 4 个数量级，相应的势垒高度  $\phi_B$  大约增大 0.27 eV。结果说明，热退火明显地改善了  $WN_x/n\text{-GaAs}$  肖特基势垒特性，同时表明具有良好的热稳定性。这种改善趋势与  $ZrN/n\text{-GaAs}$ <sup>[3]</sup> 和  $TiN/n\text{-GaAs}$ <sup>[4]</sup> 肖特基二极管的结果是相一致的。

对于反向偏置的肖特基二极管，理论分析表明反向饱和电流主要由肖特基势垒高度决定，随着反向偏压增加比较缓慢。实际上由于材料工艺等因素影响往往会上复合电流。实验中，我们用完全相同的工艺条件制做肖特基二极管，对两种不同的 GaAs 材料作了对比。结果发现，用美国 Fluoroware 公司的 GaAs 材料制做的肖特基二极管反向饱和电流比国产 GaAs 片制做的二极管反向电流要低 1—2 数量级。从 GaAs 材料提供的参数来看，主要差别是国产 GaAs 材料位错密度较高。因此深入研究 GaAs 材料对器件特性的影响，提高国产 GaAs 材料质量是一项很有意义的工作。 $WN_x/n\text{-GaAs}$  肖特基二极管反向击穿电压测量结果表明，随着退火温度的升高，二极管的反向击穿电压增大，即由 500°C 退火时的 3V 增大到 800°C 退火后的 9V。同时可以看到，随着退火温度的升高，反向击穿特性曲线逐渐变得陡直。

我们还研究了  $WN_x/n\text{-GaAs}$  肖特基势垒的 C-V 特性。按照单边突变结模型，对于均匀掺杂衬底，C-V 特性遵循  $C^{-2}-V$  的直线关系：

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_b - V)}{q\epsilon N_D}$$

式中  $N_D$  为衬底掺杂浓度， $V_b$  为自建势， $V$  为外加偏压， $\epsilon$  为 GaAs 的介电常数。图 3 给出了经不同温度退火的  $WN_x/n\text{-GaAs}$  肖特基二极管的  $C^{-2}-V$  典型曲线。由图可以看出，该  $C^{-2}-V$  曲线为一组直线，表明符合单边突变结近似假设。同时可以看到随着退火温度的升高，二极管势垒电容逐渐减小。我们知道，较小的势垒电容可以减小 RC 延

迟, 对提高 GaAs 电路速度十分有利。这种特性与其它难熔金属氮化物/GaAs 肖特基势垒的特性是符合的。

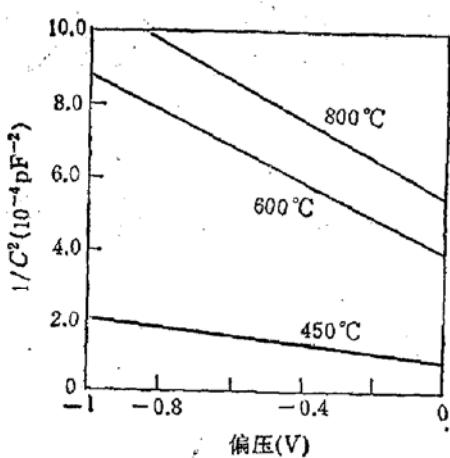


图 3 不同退火温度的  $WN_x/n\text{-GaAs}$  肖特基势垒  $C^{-2}\text{-}V$  曲线

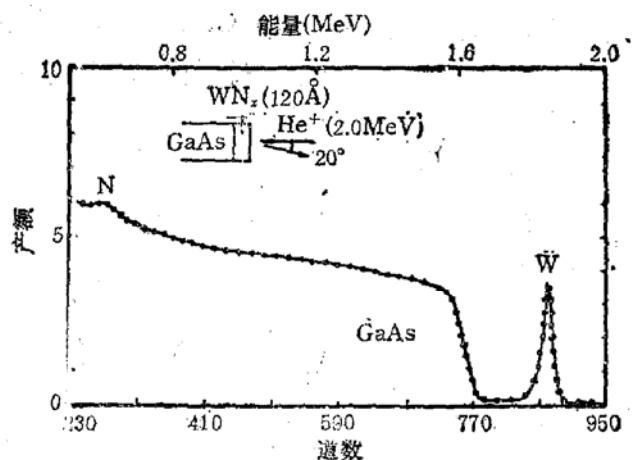


图 4  $WN_x/\text{GaAs}$  肖特基势垒的 RBS 谱  
——退火前 ..... 800°C 退火后

为了研究冶金学界面的稳定性, 我们用卢瑟福背散射 (RBS) 方法检测  $WN_x/\text{GaAs}$  界面的互扩散和界面反应。RBS 由 5SDHZ2×1.7 MeV 串列加速器获得, 入射  $\text{He}^+$  粒子能量为 2.0 MeV, 散射角为 160°, 探测器分辨率为 16 keV。经 RSVP 程序分析, 结果表明 GaAs 衬底上的  $WN_x$  薄膜厚度为 120 Å, 与  $\alpha$ -step 台阶仪测量结果相符。图 4 给出了  $WN_x/\text{GaAs}$  肖特基势垒的 RBS 谱。在 RBS 分辨率范围内, 800°C 快速热退火前后的两条谱线重合得很好, 表明  $WN_x$  层与 GaAs 衬底之间没有观察到界面反应和互扩散迹象。同时借助 AES 方法我们分析了 800°C 热退火前后的  $WN_x/\text{GaAs}$  界面特性。图 5 是  $WN_x/\text{GaAs}$  肖特基势垒的俄歇谱图。在 AES 谱中没有发现其它杂质的沾污, 说

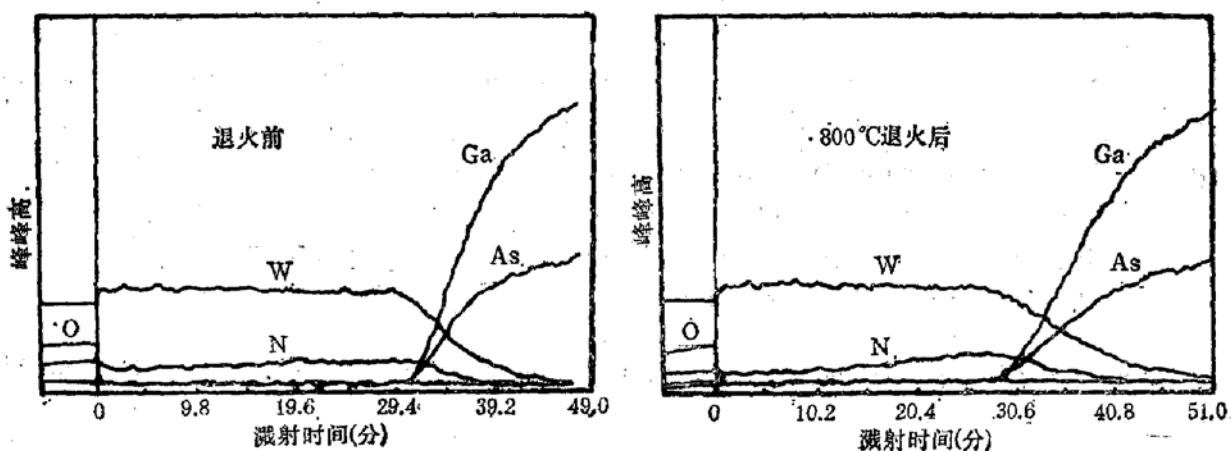


图 5 800°C 退火前后的  $WN_x/\text{GaAs}$  接触的俄歇谱

明  $WN_x$  薄膜淀积和工艺控制是严格的。 $WN_x$  薄膜中 N, W 分布均匀, 它有效地防止了 Ga 或 As 元素的外扩散, 表明  $WN_x$  是一种有效的扩散阻挡层材料。同时由图可以

看出,退火前和800℃退火后的二种谱线非常相似,说明高温退火后  $WN_x/GaAs$  界面基本没有变化,是比较稳定的。

综上所述,  $WN_x/n\text{-GaAs}$  肖特基势垒具有良好的电学特性和高温稳定性。同时,高温退火明显地改善了  $WN_x/n\text{-GaAs}$  肖特基势垒特性:势垒高度增大,势垒电容减小和二极管反向击穿电压增大。对于自对准高温栅 GaAs MESFET 工艺来说,  $WN_x$  是一种理想的栅材料。

本工作得到了北京大学微电子所孙玉秀同志、技术物理系夏宗璜同志的热情帮助,作者深表谢意。

### 参 考 文 献

- [1] L.C. Zhang (张利春) *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 445 (1987).
- [2] X.W. Wu *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 287 (1987).
- [3] 张利春等,半导体学报, **10**, 161(1989).
- [4] 张利春等,半导体学报, **10**, 241(1989).
- [5] A.E. Geissberger *et al.*, *J. Vac. Sci Technol.*, **A4** (6), 3091 (1986).
- [6] N. Uchitomi *et al.*, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B4**(6), 1392(1986).

## Characteristics of $WN_x/n\text{-GaAs}$ Schottky Barriers\*

Zhang Lichun, Gao Yuzhi, Ning Baojun, Fang Kewei  
(Institute of Microelectronics, Peking University)

Wang Suofa and Chai Shumin  
(Center of Microelectronics, Academia Sinica, Beijing)

### Abstract

The characterization of  $WN_x/n\text{-GaAs}$  Schottky barriers prepared by magnetron sputtering is investigated using Auger electron spectrum, Rutherford backscattering spectra, current-voltage and capacitance-voltage measurements. The results show that  $WN_x/n\text{-GaAs}$  Schottky contact annealed at 800°C is thermally stable and maintain excellent rectifying characteristics. The corresponding barrier height of 0.79 eV and ideality factor of 1.19 are obtained. Our study suggests that  $WN_x$  is a good material for self-aligned GaAs MESFET process.

**Key words** Reactive sputtering,  $WN_x$ , GaAs, Schottky barrier, Self-aligned GaAsMESFETs