

WSi_x 薄膜及其与 GaAs 接触的特性*

翁觉伟** 忻尚衡 史常忻 陈益新

(上海交通大学应用物理系)

1987年5月11日收到

本文研究了用 RF 溅射法形成之不同化学组份的 WSi_x 薄膜在退火前后的电阻率和内应力及 WSi_x/n-GaAs 肖特基接触的特性。结果表明：x 的变化对薄膜及肖特基接触特性有严重影响，当 x = 0.62 时，给出可耐 800°C 退火、具有高温稳定性的 WSi_x/n-GaAs 肖特基接触 ($\phi_b = 0.8\text{eV}$, n = 1.1)，并在 WSi_x 栅自对准 GaAs MESFET 中取得了应用。

主题词：GaAs, WSi_x, 自对准 GaAs MESFETs

一、引言

高性能 GaAs MESFET 的研究是实现高速 GaAs LSI 的必要条件。为了获得高增益、低噪声的 GaAs MESFET，减小源串联电阻 R_s 是重要途径之一^[1]。自对准离子注入工艺是实现这一目标的有效手段^[2]。同时作为 n⁺ 层注入掩膜的栅极材料在离子注入后必须经受高温热退火。因此，关键问题是选择具有电阻率低、内应力小及与 GaAs 肖特基接触高温稳定性好的材料^[3]。

本文对采用 RF 溅射法形成 WSi_x 薄膜的电阻率、内应力、晶体结构及其与 n-GaAs 形成的肖特基结经高温退火前后的特性进行了研究，同时，用俄歇电子能谱 (AES) 和卢瑟福背散射能谱 (RBS) 分析了高温退火对 WSi_x/GaAs 界面性质的影响。从而给出了适宜于自对准 GaAs MESFET 中应用的 WSi_x 薄膜的工艺及其特性。

二、薄膜特性与化学组份的关系

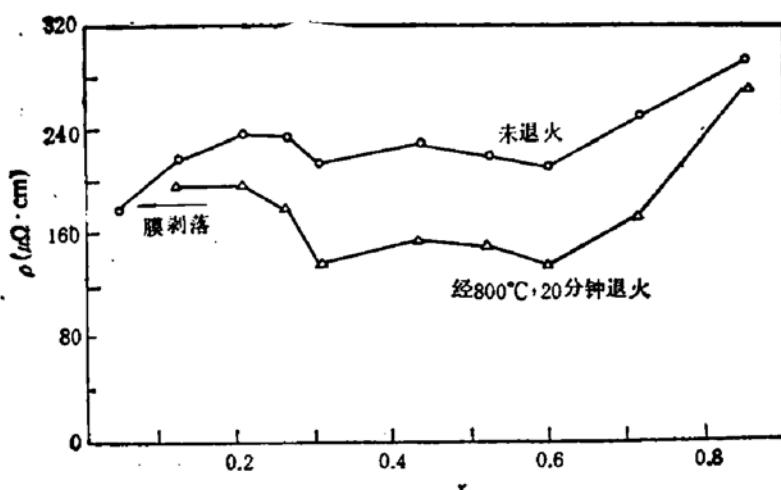
在(100) GaAs 村底上，用 RF 溅射法形成 WSi_x 薄膜，通过改变靶中 W 和 Si 的有效溅射面积实现薄膜组份的控制。溅射条件为：本底真空 $3-6 \times 10^{-7}$ 托；Ar 气压强 $2-3 \times 10^{-2}$ 托；有效功率 180—200W。薄膜的化学组份用电子探针测定。

1. 电阻率

用四探针法测量了 WSi_x 薄膜的电阻率。结果如图 1 所示。未经退火的薄膜，其电阻率随着 x 的增大而增加，x 在 0.1—0.6 范围内，电阻率基本保持不变。当 x > 0.6 时，

* 本工作为国家自然科学基金资助项目

** 现址：华东师范大学电子科学技术系，上海

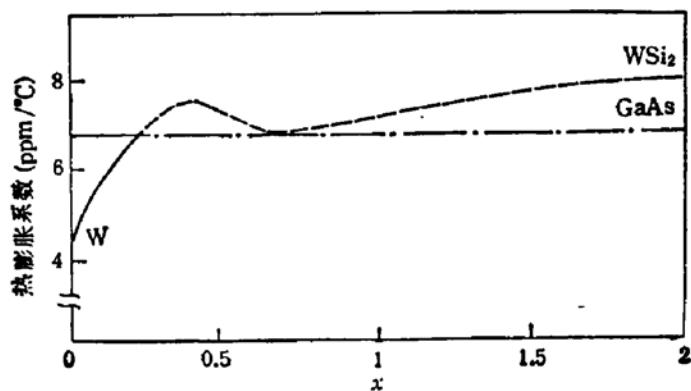
图1 WSi_x 薄膜电阻率与化学组份的关系

又急剧增加。薄膜经 800°C、20 分钟退火后,由于存在很大的内应力, $x < 0.1$ 的膜完全剥落,无法进行测量。 $x > 0.1$ 时, x 越大的薄膜,退火后电阻率下降越多。当 x 在 0.3 和 0.6 附近时,电阻率呈现极小,典型值为 130—140 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 。 $x > 0.6$ 时,电阻率又急剧增加。另外,发现退火时间在 10 分至 40 分钟之间,电阻率的值基本不变。我们认为,退火前后影响薄膜电阻率的机制不同:退火前,膜中 Si 含量的影响是主要的。Si 含量高,相应电阻率大,反之亦然;而退火后,膜中内应力的影响是主要的。内应力大,相应电阻率大,反之亦然。

2 内应力

用 RF 激射法淀积在 GaAs 衬底上的 WSi_x 薄膜,在 650°C 以下退火,内应力变化不大。但经 800°C 左右退火后,内应力显著增大,对薄膜性质呈现重要影响。

图 2* 是一组化学组份不同的 WSi_x 薄膜经 800°C、20 分钟退火前后的表面形貌图。退火前,各种组份的薄膜样品表面都很光洁。可以看到,经退火后, $x > 0.6$ 时,表面呈气泡状,而 $x < 0.3$ 时,表面发皱。 $0.3 < x < 0.6$ 时,表面亦呈少量气泡状。只当 x 在 0.3 和 0.6 附近,退火前后表面形貌不变。应力的产生是由于 WSi_x 薄膜与衬底 GaAs 材

图2 WSi_x 薄膜的热膨胀系数与化学组份的关系

* 图2见图版L

料热膨胀系数不同所致。图 3 是根据各种组份薄膜退火后的形貌推断出的 WSi_x 热膨胀系数与化学组份 x 之间的关系。与 GaAs 的热膨胀系数相比较, 当 $x < 0.3$ 时, 膜中为张应力, 当 $x > 0.3$ 时, 膜中为压应力, 当 x 在 0.3 和 0.6 附近, 膜中内应力极小。

3. 晶体结构

用 X 射线衍射技术对 WSi_x 薄膜退火前后的晶体结构进行了分析, 实验中采用 $Cu-K\alpha$ 线, 波长为 1.5405 \AA 。

图 4 是 $WSi_{0.62}$ 薄膜的衍射图。退火前, 薄膜呈非晶态。经 800°C 以上退火, 薄膜为 W, Si_3 二次固溶体。此外, 还对 x 为 0.18、0.32、0.56 和 0.73 的 WSi_x 薄膜进行了分析。结果表明: 退火前, 薄膜均呈非晶态。退火后, 薄膜的晶体结构与化学组份的关系甚密。 $x < 0.60$, 衍射图中同时出现 W 和 W, Si_3 峰, 且随着 x 的增大, W 峰渐弱, 而 W, Si_3 峰渐强, 直至 $x = 0.60$, W 峰完全消失。 $x > 0.66$, 衍射图中出现非晶成分。由此可见, WSi_x 薄膜在 $x < 0.60$ 时, 由含 Si 量最大的 W 固溶体和含 Si 量最小的 W, Si_3 二次固溶体的包晶结构组成。 $0.60 < x < 0.66$, 由单一的 W, Si_3 二次固溶体组成。 $x > 0.66$, 由含 Si 量最大的 W, Si_3 二次固溶体和析出的非晶 Si 的共晶结构组成^[4]。

4. 界面性质

高温退火会引起 $WSi_x/GaAs$ 界面的互扩散和化学反应。图 5 是 $WSi_{0.62}/GaAs$ 接触界面的 AES 深度剖面分析。显而易见, 经高温退火后, 界面存在互扩散现象。图 6 是 GaAs 村底表面处的 AES 能谱。不难看出, 退火后 Si 峰和 W 峰明显增强。

图 7 是 $WSi_{0.62}/GaAs$ 接触界面的 RBS 图。退火后, GaAs 界面发生了移动, W 和 Si 的散射谱高度略有下降, 这些现象可能是由于界面反应和互扩散引起的。但是, 由图可见, 退火前后界面变化并不十分明显, 说明界面是比较惰性的。

我们还对 $x = 0.62$ 的各种界面进行了分析, 结果与上述情况类似。在一定范围内, x 的变化对退火后的界面性质影响很小。

综上所述, 用 RF 激射法形成的 WSi_x 薄膜及其与 GaAs 的接触, 在经高温退火前后, 有如下性质: 退火前, 薄膜呈非晶态。经 800°C 左右退火后, 不同 x 值的薄膜特性有显著不同。 $x < 0.3$, 退火前后电阻率无明显变化, $x = 0.3$ 和 $x = 0.6$, 退火后电阻率大幅度下降并且内应力均为极小, $x > 0.66$, 退火后电阻率亦无明显下降。除 $x = 0.6$ 薄膜为 W, Si_3 二次固溶体组成外, 其余组份的 WSi_x 薄膜均为混合晶体结构组成。退火后

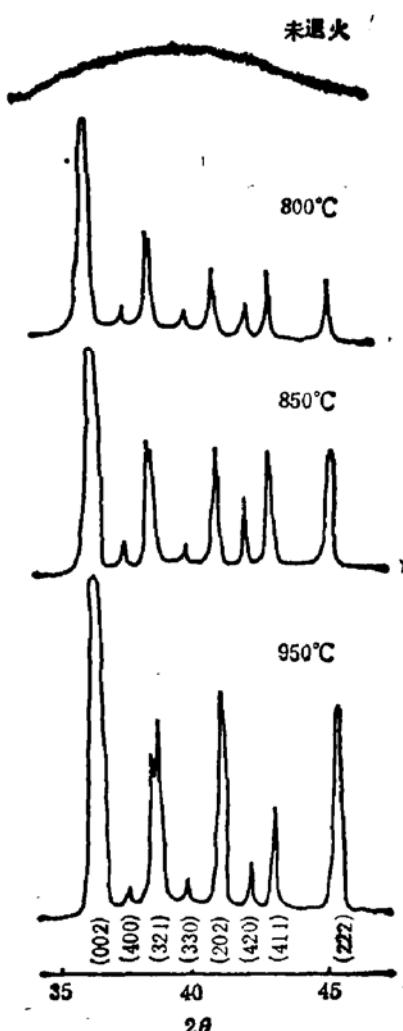


图 4 $WSi_{0.62}$ 薄膜的 X 射线衍射图

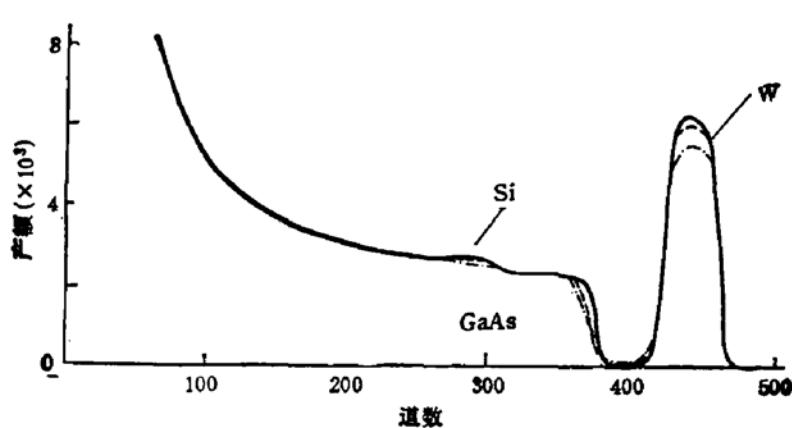
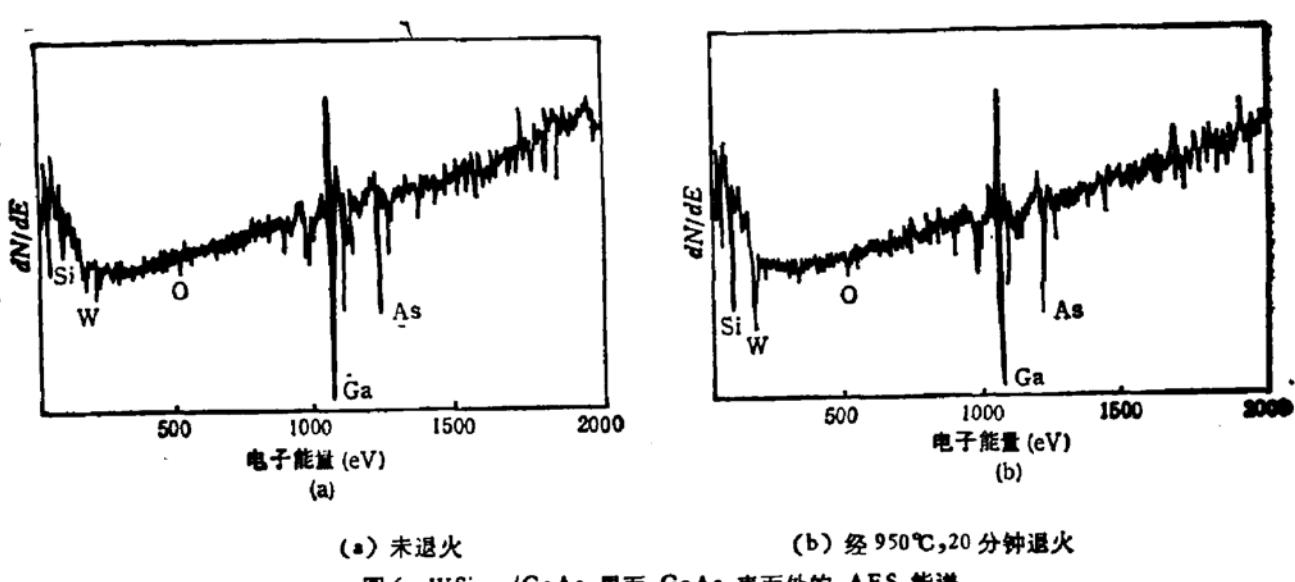
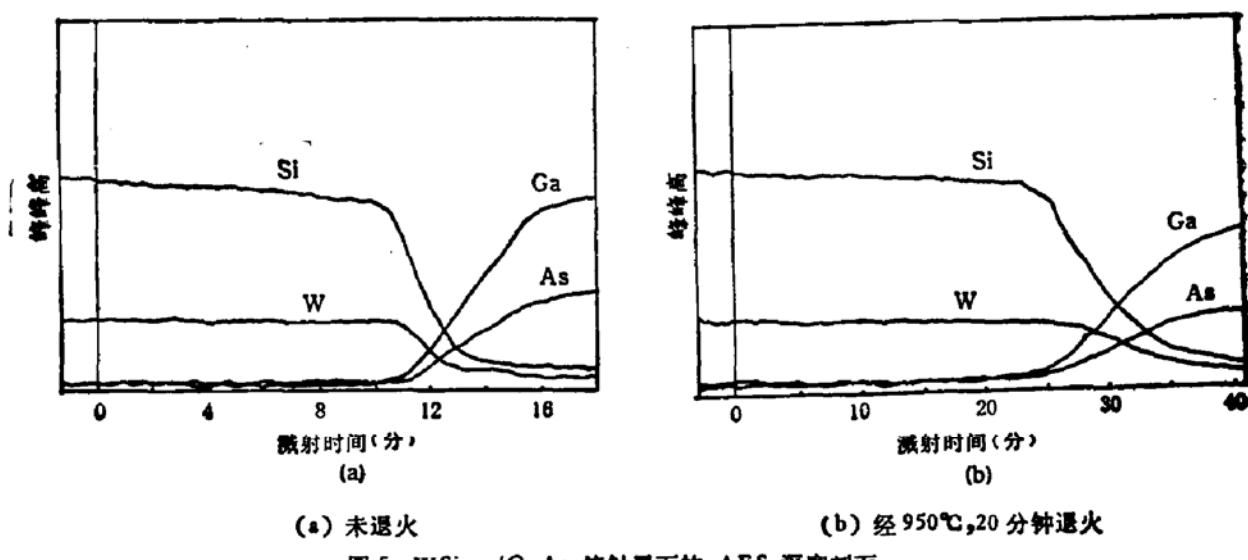


图 7 $\text{WSi}_{0.62}/\text{GaAs}$ 接触界面的 RBS 能谱
——未退火 ----- $800^\circ\text{C}, 40$ 分钟 -·-·- $950^\circ\text{C}, 40$ 分钟

WSi_x/GaAs 界面存在互扩散和化学反应,但不剧烈。

三、WSi_x/n-GaAs 肖特基二极管特性

1. 样品制备

在掺杂浓度为 10^{18} cm^{-3} 的 GaAs 低阻衬底上生长一层 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 的外延层, 厚度为 $0.4\text{--}0.5 \mu\text{m}$, 衬底上用 RF 溅射法形成厚度约为 6000 \AA 的 WSi_x 薄膜, 然后用反应离子刻蚀 ($\text{CF}_4 + \text{O}_2$) 形成直径为 $100 \mu\text{m}$ 的肖特基结。样品经高温退火, 在背面蒸发一层 Au-Ge-Ni/Au, 再经 450°C 、1 分半钟合金化后形成欧姆接触。

2. 测量方法

I-V 特性的测量是用干电池作电源, 偏置电压 (V) 是由 Pz 26 b 型直流数字电压表测量, 电流 (I) 是用 ZC-36 型微电流测试仪测定的, 误差为 $\pm 10\%$ 。

按热电子发射理论, 肖特基二极管的正向 J_F-V 特性在 $V > \frac{3kT}{q}$ 条件下, 由如下各式所确定:^[5]

$$J_F = J_s \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right)$$

$$J_s = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right).$$

$$\text{所以, } \phi_B = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{A^* T^2}{J_s}\right)$$

$$n = \frac{q}{kT} \frac{\Delta V}{\Delta \ln J_F}$$

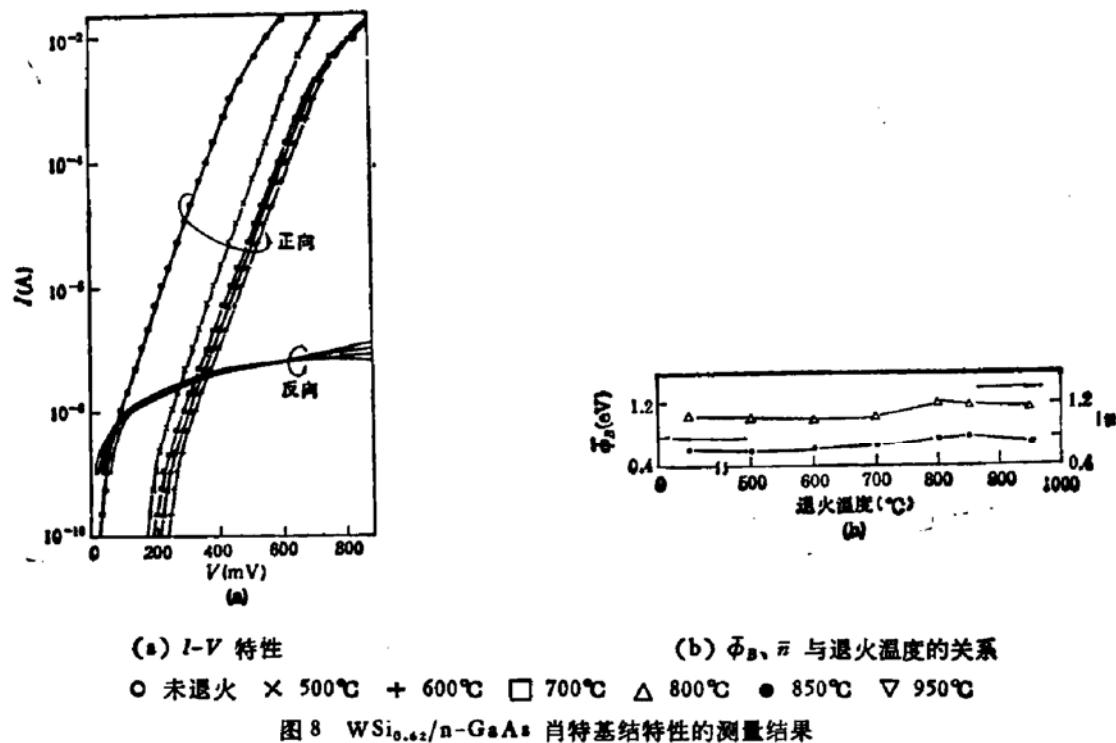
式中 J_F 是正向电流密度, A^* 是有效理查逊常数(对于 GaAs, 取 $A^* = 8.44 \text{ Am}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$), n 是理想因子, J_s 是饱和电流密度, ϕ_B 是势垒高度。

在计算中, 先在 $\ln I_F-V$ 半对数坐标系上作图, 确定其线性范围。然后把每 4 个测量点 (I_i, V_i) 分为一组。用最小二乘回归法计算得到 ϕ_B 、 n 和 J_s 等值, 并计算它们的均方差 σ_n 和 σ_{ϕ_B} 。实验中还从 $\ln I_F \sim V$ 曲线在 $10\text{mA}-20\text{mA}$ 范围内, 求出线性范围区外推线与实测曲线水平位移 ΔV , 再根据 $\Delta V = IR_s$ 式, 确定在该区域中的串联电阻 R_s , 对 $I-V$ 曲线加以修正。以正向 $10 \mu\text{A}$ 下的电压值 $(V_F)_{10\mu\text{A}}$, 定为正向起动电压。

3. 测量结果及讨论

对 RF 溅射形成的 WSi_{0.62}/n-GaAs 肖特基结, 和分别经 500°C 、 600°C 、 700°C 、 800°C 、 850°C 和 950°C 各 20 分钟在 H_2 气氛中退火的肖特基结进行了测量和计算, 结果列于表 1 和图 8。

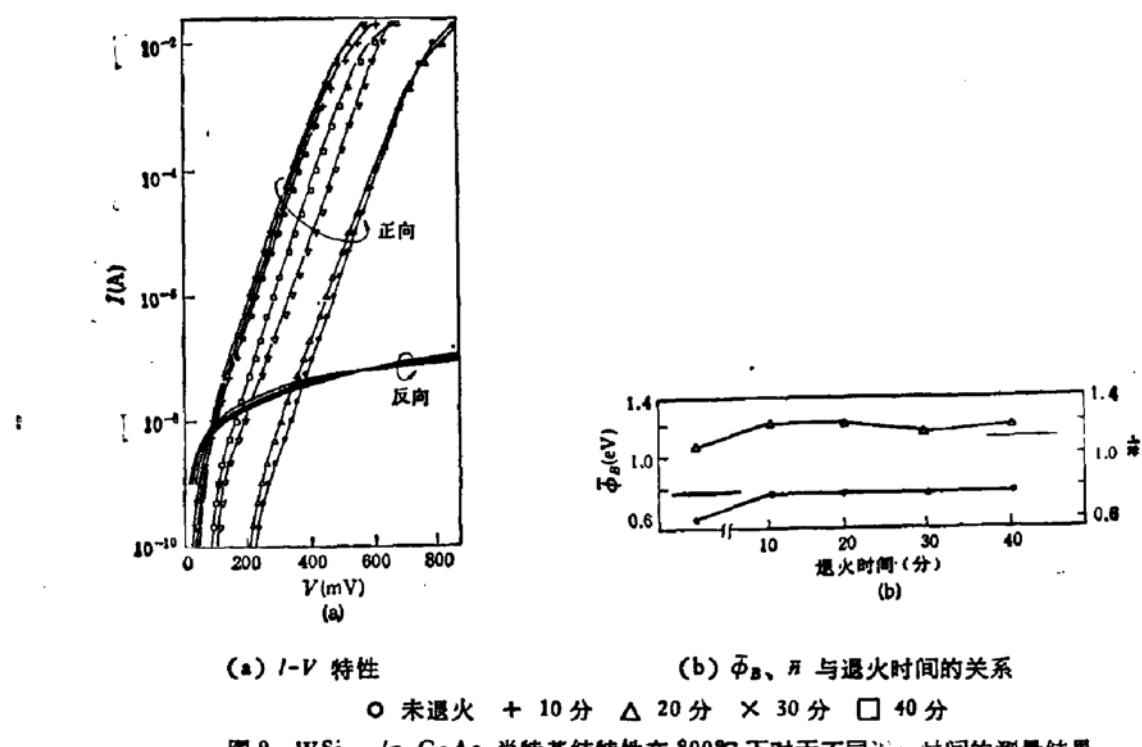
由正向 $I-V$ 特性可知, 退火前后的线性区范围基本相同。 700°C 以下退火样品的特性与退火前相似。经 700°C 以上退火, 线性区斜率和串联电阻 R_s 基本保持不变, $(V_F)_{10\mu\text{A}}$ 增大, 势垒高度上升。反向 $I-V$ 特性表明: 退火前后漏电流无明显变化。我

图 8 $\text{WSi}_{0.62}/\text{n-GaAs}$ 肖特基结特性的测量结果表 1 $\text{WSi}_{0.62}/\text{n-GaAs}$ 肖特基结特性的测量计算结果

参数 \ 温度	未退火	500°C	600°C	700°C	800°C	850°C	950°C
线性区范围	1×10^{-9} $\sim 1 \times 10^{-3}$	1×10^{-9} $\sim 1 \times 10^{-3}$	1×10^{-9} $\sim 1 \times 10^{-3}$	1×10^{-9} $\sim 2 \times 10^{-3}$	1×10^{-9} $\sim 2 \times 10^{-3}$	5×10^{-10} $\sim 2 \times 10^{-3}$	1×10^{-9} $\sim 2 \times 10^{-3}$
n	1.09	1.07	1.06	1.10	1.21	1.22	1.19
σ_s	2.66×10^{-2}	3.77×10^{-2}	3.43×10^{-2}	2.02×10^{-2}	2.27×10^{-2}	8.21×10^{-2}	1.29×10^{-2}
Φ_B (eV)	0.664	0.651	0.665	0.716	0.816	0.850	0.751
$\sigma_{\Phi B}$	5.57×10^{-4}	9.51×10^{-4}	1.05×10^{-3}	9.62×10^{-4}	1.66×10^{-3}	8.45×10^{-4}	7.95×10^{-4}
$(V_F)_{10\mu\text{A}}$ (mV)	296	272	283	349	524	545	416
R_s (Ω)	5	4	5	5	5	4	—
J_s (A/cm^2)	7.89×10^{-4}	1.68×10^{-3}	1.06×10^{-3}	1.40×10^{-3}	3.28×10^{-3}	7.11×10^{-3}	3.33×10^{-3}

们认为：高温退火引起界面一定的互扩散和化学反应形成的界面层可能是导致势垒上升的原因^[6,7]。尽管退火使势垒高度有所改善，相应理想因子也略有上升。但退火前后的参数基本保持近理想状况，说明肖特基结具有很好的高温稳定性。

图 9 是对 800°C 条件下经 10 分、20 分、30 分和 40 分钟退火后的 $\text{WSi}_{0.62}/\text{n-GaAs}$ 肖特基结进行测量和计算的结果。表明退火时间的长短对结特性影响不大。

图9 WSi_{0.62}/n-GaAs 肖特基结特性在 800℃ 下对于不同退火时间的测量结果

此外,我们还分别对 x 为 0.32、0.56、0.73 和 0.87 的 WSi_x/n-GaAs 肖特基结经各种温度退火后的特性进行了测量和计算。结果表明:未经退火和经 700℃ 以下退火的肖特基结,其特性基本不受 x 变化的影响,势垒高度为 0.6—0.7eV,理想因子在 1.1 左右。经 800℃ 左右高温退火的肖特基结,势垒高度下降,理想因子显著偏离于 1, 特性全面退化,不具有高温稳定性,且 x 的变化对其退化程度影响甚大。

4. 在自对准器件中的应用

用 WSi_{0.62} 作为自对准器件的栅材料,制作了自对准栅 GaAs MESFET。图 10 是自对准栅 FET(a) 和常规法制作的 Al 栅 FET(b) 输出特性的比较。可以看出,由于自对准器件大大降低了源、漏串联电阻,其跨导显著提高,特性线性区的源漏导通电阻也明显下降,器件性能得以改善。关于自对准 GaAs MESFET 的详细讨论,将另文发表。

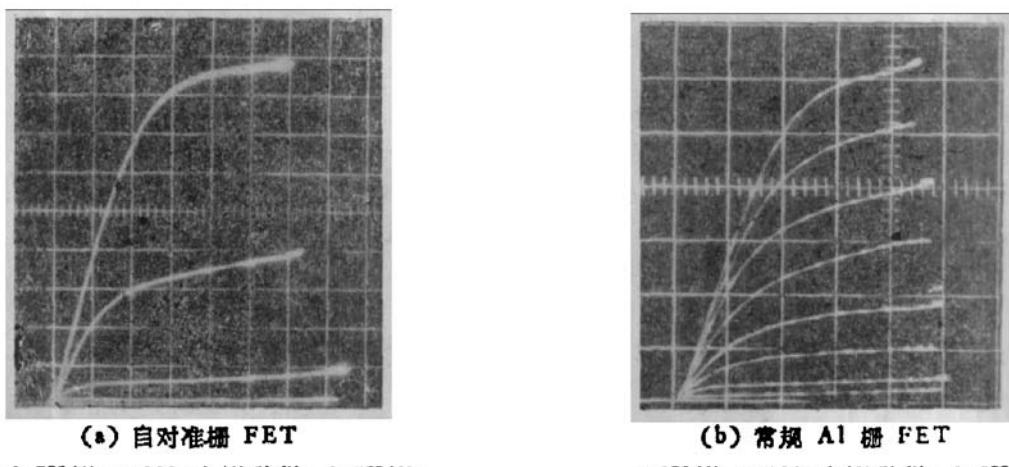


图10 GaAs MESFET 的输出特性

四、结 论

1. 在 GaAs 衬底上采用 RF 溅射法形成的 WSi_x 薄膜，其化学组份对高温退火后的特性影响显著；
2. * 在 0.62 左右，经 800°C 退火后，电阻率明显下降。膜中内应力最小， $WSi_{0.62}/n$ -GaAs 肖特基结具有很好的高温稳定性；
3. * 偏离 0.62 的薄膜，经 800°C 退火后，薄膜特性均呈现劣化， WSi_x/n -GaAs 肖特基结不具有高温稳定性；
4. 用 $WSi_{0.62}$ 作为自对准 GaAs MESFET 的栅材料，使器件性能得到很大改善。

本工作得到我校杨春生、李晓明及中国科学院上海冶金研究所 GaAs 气相外延组的协助，特此致谢。

参 考 文 献

- [1] K. Asai, et al., Proceedings of symposium on gallium arsenide and related compounds, 1981.
- [2] N. Yokoyama, et al., ISSCC Digest of technical papers, P. 218, Feb. 1981.
- [3] D. A. Allan, et al., IEE proceedings, 133, Pt. 1, 18(1986).
- [4] T. Ohnishi, et al., Appl. Phys. Lett., 43, 600(1983).
- [5] S. M. Sze, Phys. Semiconductor Devices (John Wiley & Sons, 2nd Edition, 1981), Chap. 5.
- [6] E. H. Rhoderick, Metal-Semiconductor Contacts (Clarendon Press, 1978), Chap. 2—3.
- [7] H. C. Card, One dimensional analysis of heat treated aluminium-silicon junctions, Institute of physics, ser. No. 22, P. 129, 1974.

Characteristics of WSi_x Films and Its Contact to GaAs

Weng Juewei*, Xin Shanghen Shi Changxin and Chen Yixin

(Department of Applied Physics, Shanghai Jiaotong University)

Abstract

The resistances and stresses of MSi_x and WSi_x/n -GaAs Schottky contacts using RF sputtered films with variety of compositions have been investigated before and after annealing. Experimental results show that the characteristics of the films and Schottky contacts depend significantly on X . When $X=0.62$, WSi_x/n -GaAs Schottky contact exhibits a high temperature stability after annealing at 800°C. ($\phi_B=0.8$ eV, $n=1.1$). A self-aligned GaAs MESFET has been fabricated using RF sputtered WSi_x -gate.

KEY WORDS: GaAs, WSi_x , Self-aligned GaAs MESFETs

* Present address: East China Normal University, Shanghai.