

全离子注入自对准难熔金属氮化物复合栅 GaAs MESFET 技术研究*

高玉芝 张利春 尹红坤 宁宝俊

(北京大学微电子研究所 北京 100871)

摘要 本文研究了先进的全离子注入自对准难熔金属氮化物复合栅 GaAsMESFET 场效应晶体管的工艺技术. 首次使用 Mo/ZrN 作为复合栅的材料, AlN 薄膜作为器件介质钝化层, 制作出了可用于 GaAs 超高速集成电路的场效应晶体管, 晶体管的跨导为 160mS/mm, 其栅漏反向击穿电压大于 5V.

PACC: 2520D, 2560S

1 引言

随着超大规模集成电路技术的发展, 砷化镓 MESFET 器件和电路已得到广泛的应用. 为了获得性能更为优良的器件, 目前多采用较为理想的自对准 GaAs MESFET 结构. 在高温栅自对准工艺中, 要求栅材料电阻率低, 肖特基势垒特性好, 并且要求有良好的高温稳定性. 我们系统地研究了几种难熔金属氮化物与 GaAs 的肖特基势垒特性^[1~6], 发现这类氮化物 GaAs 肖特基势垒具有优良的电学特性和高温稳定性. 本文首次报道了用难熔金属氮化物 ZrN 作为栅材料, 用 AlN 薄膜作介质层, 研制出了性能较为理想的全离子注入自对准 GaAsMESFET 器件, 可望用于超高速 GaAs 集成电路.

2 实验

实验采用晶向为(100)的半绝缘 GaAs 单晶片作为衬底材料, 依次用三氯乙烯、丙酮和甲醇去油, 然后用 $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} (5 : 1 : 1)$ 溶液在温度为 55℃ 条件下腐蚀 1 分钟, 去除衬底表面损伤层. 在样品进入溅射反应室之前, 用稀 HCl 溶液 (HCl : H_2O 为 1 : 1) 腐蚀 1 分钟, 以去除其 GaAs 表面的自然氧化层. 做为介质层的 AlN 薄膜和复合栅的栅材料是在 s-枪磁控溅射系统上制备的, 淀积薄膜时的工艺条件如表 1 所示.

* 国家自然科学基金资助项目

高玉芝 女, 1939 年生, 副教授, 目前主要从事硅超大规模集成电路和砷化镓集成电路的工艺研究和测试分析工作

张利春 男, 1939 年生, 教授, 主要从事硅超大规模集成电路和砷化镓集成电路的设计和工艺研究

宁宝俊 女, 1945 年生, 副研究员, 主要从事硅超大规模集成电路的设计和测试分析工作

1994 年 10 月 10 日收到初稿, 1995 年 1 月 14 日收到修改稿

表 1 薄膜淀积工艺条件

薄膜种类	AlN	ZrN	Mo	ZrN
靶材料(纯度)	Al(99.999%)	Zr(99.9%)	Mo(99.9%)	Zr(99.9%)
系统本底真空度/Pa	1.01×10^{-6}	1.04×10^{-6}	1.06×10^{-6}	1.04×10^{-6}
N ₂ 气流量/sccm	13.0	18.0	15.0	18.0
Ar 气流量/sccm	7.0	2.0		2.0
溅射功率/W	300	400	600	400
负偏压/V		-100		
薄膜厚度/nm	150	50	200	50

沟道区离子注入和源漏区离子注入的条件分别为能量 60keV, 剂量 $5 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 和能量 120keV, 剂量 $5 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$, 入射角均为 7° , 注入离子为 Si^{+29} . 注入后沟道区和有源区的离子激活是在 KS-1A 型快速热退火炉上进行的, 退火条件分别为, 在高纯氮气保护下 900°C 20 秒和 850°C 30 秒. SiON 薄膜是用 PECVD 方法制备的. 淀积条件是射频功率为 100W, 淀积温度 260°C , SiH_4 (浓度为 2.5% 的充氮硅烷) 流量 2l/min, NH_3 的流量为 0.5l/min, 反应室的压力为 73.15Pa. 电极的欧姆接触采用通常使用的 AuGeNi-Au, 合金温度为 450°C 在氮气保护下 1 分钟.

我们采用 MeF_3 型显微镜对淀积的各种薄膜的表面进行了观察, 薄膜的厚度是用 α -step200 型薄膜厚度仪测量的, 四探针测量了复合栅材料的薄层电阻. 霍耳效应测量装置测试了掺杂层的薄层电阻和电子迁移率, 用 Raman 散射方法检测了 AlN 与 GaAs, SiON 与 GaAs 的界面应力, AES 方法对比研究了 AlN/GaAs 和 SiON/GaAs 经 800°C 快速退火前后两种薄膜对 GaAs 的掩蔽作用. GaAs MESFET 场效应晶体管的电学特性是在 HP4145B 半导体参数分析仪上测量的.

3 实验结果

3.1 难熔金属氮化物复合栅的研究

在自对准 GaAs MESFET 工艺中, 栅直接作源漏离子注入的掩模, 须经受 $800^\circ\text{C} \sim 900^\circ\text{C}$ 的热退火, 以激活载流子和消除离子注入所引起的损伤. 因此, 栅材料对 GaAs 衬底必须有良好的肖特基势垒特性和高温稳定性. 难熔金属氮化物具有电阻率低, 肖特基势垒高, 高温稳定性好等突出的优点, 所以选用难熔金属氮化锆 (ZrN) 作为 GaAs MESFET 的栅材料.

为了减小栅材料的电阻率, 我们采取了以下的有效措施: (1) 采用衬底负偏压溅射方法淀积 ZrN 薄膜^[7]. 衬底负偏压有两个基本作用: 一是衬底加负偏压会减少电子轰击, 增加离子轰击, 可以清洁样品表面并改善淀积膜与衬底的附着性能; 另一个作用是衬底加负偏压, 会减少向衬底运动的氧负离子数量, 可以有效地减少淀积膜中氧的沾污, 使 ZrN 薄膜电阻率降低. 经过工艺优化, 选用 100V 负偏压制备 ZrN 薄膜. 经 800°C 快速热退火, 其电阻率可减小为 $139 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, 而不加衬底负偏压形成的 ZrN 薄膜则为 $170 \mu\Omega \cdot \text{cm}$. (2) 为了更进一步地减小栅材料的电阻率, 我们采用复合栅结构, 并对比研究了 TiW/ZrN 和 Mo/ZrN 两种复合栅的薄膜电阻率的退火特性. 结果表明, Mo/ZrN 薄膜经 800°C 快速热退火后, 其电阻率可减小为 $18.5 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, 优于 TiW/ZrN 薄膜电阻率 $24 \mu\Omega \cdot \text{cm}$. 实验中还发现, Mo/ZrN

薄膜比 TiW/ZrN 薄膜有更小的应力,更适合作 GaAs MESFET 器件的栅材料。

3.2 离子注入和退火条件的选择

对于 GaAs MESFET,源漏和沟道掺杂区都是通过 Si 离子注入来形成的.所以在 GaAs MESFET 的工艺中,选择和精确控制离子注入的能量,注入的剂量和退火条件,对于有效控制 GaAs MESFET 的电学参数,保证参数良好的均匀性和重复性是十分重要的。

为了得到高电子迁移率的沟道区和低电阻率的源漏区,我们做了三组试验,以选择合适的注入能量与剂量以及注入后退火的温度和时间。(1)能量 120keV 下用不同的注入剂量(2×10^{13} , 6×10^{13} , 1×10^{14} 和 3×10^{14} $^{29}\text{Si}^+/\text{cm}^2$)注入,然后在 960℃ 氮气保护下退火 5 秒钟,使 Si 充分激活,以考查 Si 施主激活同掺杂剂量的关系;(2)在 70keV, $7 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$ 下注入,在 800~950℃ 范围内进行 10 秒的等时快速热退火,以及在 5~15 秒范围内 950℃ 的等温快速热退火,以找出最佳退火条件;(3)用 120keV, $6 \times 10^{13}\text{cm}^{-2}$ $^{29}\text{Si}^+$ 的条件注入,在注入层的表面反应溅射淀积一层 AlN 薄膜和用 PECVD 方法淀积一层 SiON 薄膜,在 850℃ 下,在 30~120 秒范围内实现快速热退火,与表面用 GaAs 片覆盖时的结果比较以了解 AlN 薄膜作为退火保护层的特点。

实验结果表明:(1)随 $^{29}\text{Si}^+$ 离子注入剂量的增加,掺杂层的薄层电阻虽有所下降(由注入剂量为 $2 \times 10^{13}\text{cm}^{-2}$ 的 $185\Omega/\square$ 下降到注入剂量为 $3 \times 10^{14}\text{cm}^{-2}$ 的 $144\Omega/\square$),但同时迁移率和激活率也急剧下降(激活率由注入剂量为 $2 \times 10^{13}\text{cm}^{-2}$ 的 110% 下降到注入剂量为 $3 \times 10^{14}\text{cm}^{-2}$ 的 9.1%,迁移率由 $6 \times 10^{13}\text{cm}^{-2}$ 的 $2247\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 下降到 $3 \times 10^{14}\text{cm}^{-2}$ 的 $1576\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)。作为源漏离子注入,综合考虑各个因素,离子注入剂量不宜超过 $1 \times 10^{14}\text{cm}^{-2}$ 。(2)对于注入剂量为 $7 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$ 的样品,随退火温度的增加,表征掺杂层的电学性质的三个参数在 875℃ 附近都有极值,其中薄层电阻为极小($240\Omega/\square$),薄层电子密度 D_s 和电子迁移率 μ_H 为极大($3211\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$),这说明在 875℃ 附近有一个最佳退火温度,温度过低则退火激活不充分,过高则掺杂的电学性能变坏。(3)用 120keV, $6 \times 10^{13}\text{cm}^{-2}$ $^{29}\text{Si}^+$ 的条件注入,用 AlN 薄膜覆盖注入层表面退火(850℃ 30~120 秒),结果与用 GaAs 光片反扣作保护的情形所测得的电学参数十分接近,并优于用 SiON 薄膜作保护层的情况。表 2 给出了测试结果。由表 2 还可以看出,随着退火时间的增长,用 AlN 薄膜覆盖退火的优点更为突出。

表 2 不同退火条件下 GaAs 的 μ_H 和 N_s 测试结果

	RTA 条件 850℃ 30"		RTA 条件 850℃ 60"		RTA 条件 850℃ 120"	
	$\mu_H/\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	N_s/cm^{-2}	$\mu_H/\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	N_s/cm^{-2}	$\mu_H/\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	N_s/cm^{-2}
SiON	2013	1.80×10^{13}	1497	1.70×10^{13}	1568	1.65×10^{13}
GaAs 片反扣	1960	1.91×10^{13}	2237	1.68×10^{13}	1830	1.56×10^{13}
AlN	2308	1.80×10^{13}	2111	1.68×10^{13}	1722	1.74×10^{13}

综合以上因素,我们确定了在 GaAs MESFET 的工艺中,沟道区离子注入的能量为 60keV,剂量为 $7 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$,退火激活的温度是 900℃,时间为 20 秒;源漏区离子注入的能量为 120keV,剂量为 $5 \times 10^{13}\text{cm}^{-2}$,退火激活的温度为 850℃,时间为 30 秒。

3.3 AlN 薄膜的特性研究

GaAs 器件和集成电路的潜在失效机理之一就是表面介质层或钝化层所引起的器件特性退化,所以对 GaAs 器件来说,优质的表面介质层是至关重要的。目前所采用的介质钝化

层多为 SiO_2 和 Si_3N_4 薄膜,但对 GaAs 来说,都不是一种好的介质钝化层材料.首先它们与 GaAs 材料的热膨胀系数相差较大^[8](SiO_2 的热膨胀系数为 $0.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, Si_3N_4 的热膨胀系数为 $2.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,而 GaAs 材料的热膨胀系数为 $5.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$).这样,介质层与衬底之间的界面应力较大,淀积的薄膜稍厚,在高温退火中将会产生脱落或龟裂现象.其次在 SiO_2 与 GaAs 接触的界面上,由于自体氧化层(Ga_2O_3 , Al_2O_3)和 GaAs 衬底的化学反应,析出 As 元素,同时 SiO_2 层不能掩蔽 Ga 元素的扩散,从而导致表面漏电的增加,使器件特性退化.有文献报道^[9]PECVD SiON 比之 Si_3N_4 具有较低的机械应力,但仍存在问题.

基于上述原因,我们研究了一种新的介质钝化层材料——AlN,该 AlN 材料和 GaAs 同属 III-V 族化合物,AlN 的热膨胀系数为 $5.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 与 GaAs 的热膨胀系数 $5.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 十分接近,薄膜应力很小.因此,我们对磁控反应溅射淀积的 AlN 薄膜以及 PECVD 淀积的 SiON 薄膜的特性进行了研究,发现 AlN 薄膜比之 PECVD 淀积的 SiON 薄膜与 GaAs 衬底接触界面有更小的应力,是性能更为优良的介质钝化层材料.

AlN 薄膜的制备、晶体结构、组分、N/Al 原子比,我们在文献[10]已有报道.特别值得指出的是我们用 Raman 散射方法对比研究了 800°C 快速热退火前后的 AlN、SiON 两种薄膜与 GaAs 衬底之间界面的应力变化情况,由图 1(a)可以看出刚淀积的 AlN/GaAs 的 Raman 谱与 800°C 在氮气和氩气气氛中快速热退火后的 AlN/GaAs 的 Raman 谱完全重合,而且与没有淀积薄膜的 GaAs 衬底片的 Raman 谱几乎重合.该结果表明,所淀积的 AlN 薄膜晶体结构稳定,且与 GaAs 衬底界面应力非常小.由图 1(b)可以看出, SiON 薄膜经 800°C 快

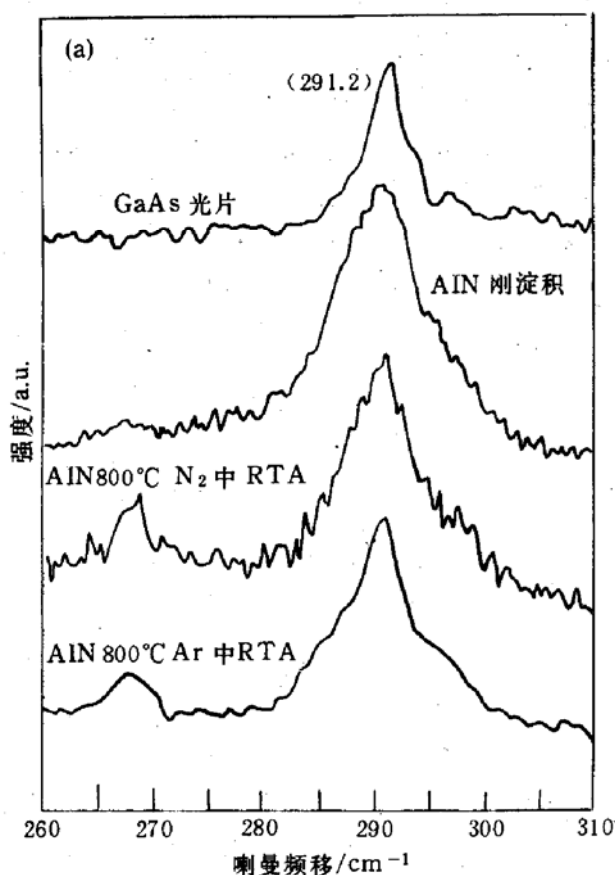


图 1(a) AlN/GaAs 在 N_2 , Ar 气氛中 800°C 退火前后的 Raman 谱

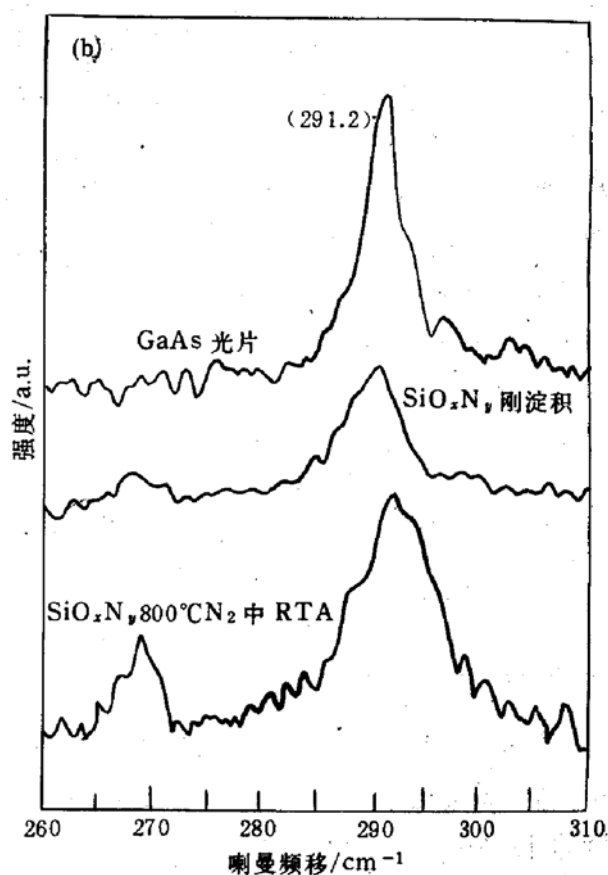


图 1(b) SiON/GaAs 在 N_2 , Ar 气氛中 800°C 退火前后的 Raman 谱

速热退火前后的两个 Raman 谱不重合,有 1.6cm^{-1} 波数的位移,这样较大的位移意味着在 SiON 薄膜与 GaAs 衬底界面存在着较大的应力,按照 Cerderia 等人^[11]给出的公式进行计算,刚淀积的 AlN 与 GaAs 界面应力为 $1.52 \times 10^8 \text{Pa}$;而刚淀积的 SiON 与 GaAs 界面应力为 $3.04 \times 10^8 \text{Pa}$. 不难看出刚淀积的 AlN 薄膜的应力比 SiON 薄膜的小. 800°C 快速热退火后,AlN/GaAs 的 Raman 谱与刚淀积的 Raman 谱完全重合,表明 AlN 薄膜与 GaAs 界面应力退火前后没有发生变化. 而 SiON/GaAs 退火前后的 Raman 峰有 1.6cm^{-1} 的位移,这相当于有 $6.08 \times 10^8 \text{Pa}$ 的应力变化,比 AlN 薄膜应力大 4 倍,由此可以看出,AlN 薄膜更适合做 GaAs 器件的介质钝化膜.

图 2 给出了 AlN/GaAs 和 SiON/GaAs 经 800°C 20 秒在氮气保护下退火前后的 AES 深度分布. 由图 2(a)可以看出 AlN/GaAs 经 800°C 20 秒快速热退火后,没有发现 Ga、As 原子外扩散现象,而对于 SiON/GaAs,由图 2(b)清楚看出,经 800°C 20 秒快速热退火后, Ga、As 原子已扩散到 SiON 层的外表面,这说明 AlN 薄膜比 SiON 薄膜对 Ga、As 原子的外扩

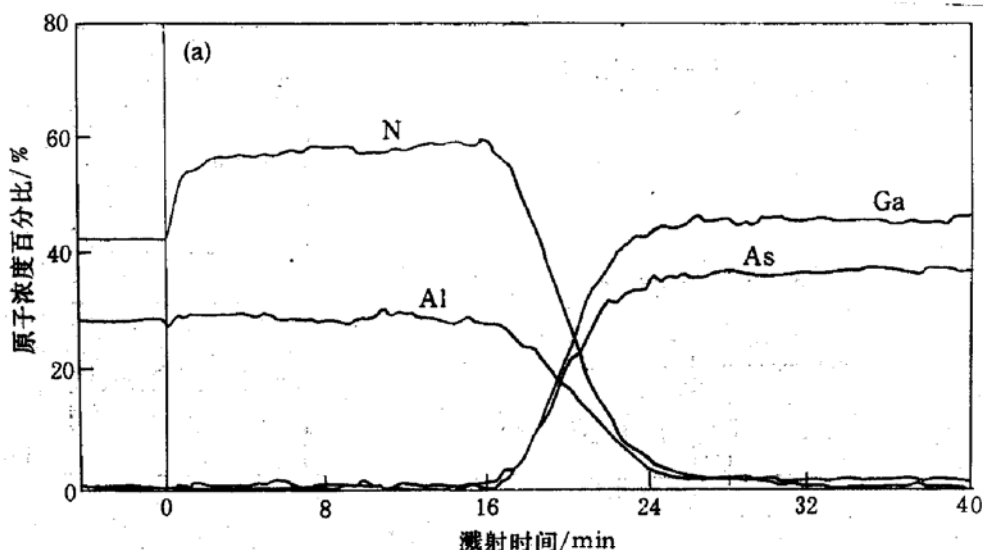


图 2(a) AlN/GaAs 经 800°C 退火后的 AES 谱

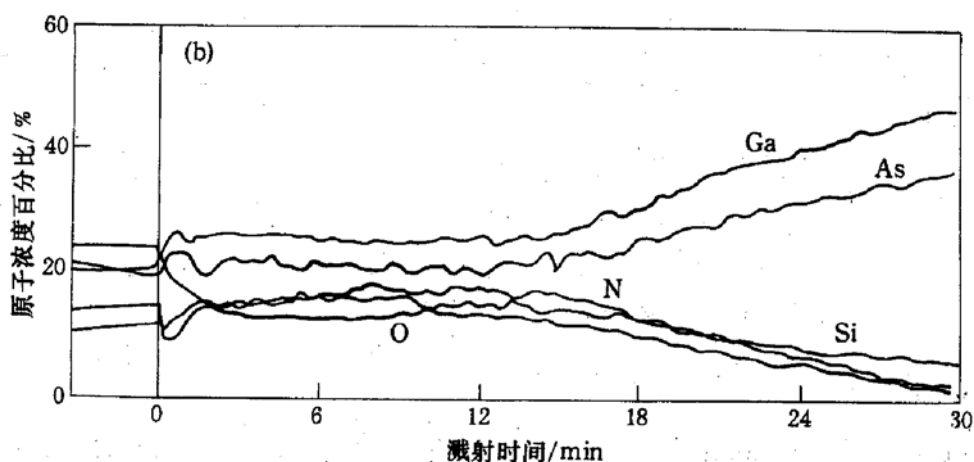


图 2(b) SiON/GaAs 经 800°C 退火后的 AES 谱

散有更好的阻挡作用.

基于 AlN 薄膜比 PECVD SiON 薄膜对 GaAs 衬底来讲有更小的应力和防止 As、Ga 外

扩的优点,我们在 GaAs MESFET 工艺流片中采用了 AlN 薄膜做为介质层.

3.4 GaAs MESFET 工艺和器件特性

在 GaAs MESFET 制作工艺中,我们使用了难熔金属氮化锆作为复合栅的栅材料及采用 AlN 薄膜作为介质钝化层制备了自对准全离子注入 GaAs MESFET 场效应晶体管,该晶体管的工艺流程如图 3 所示.

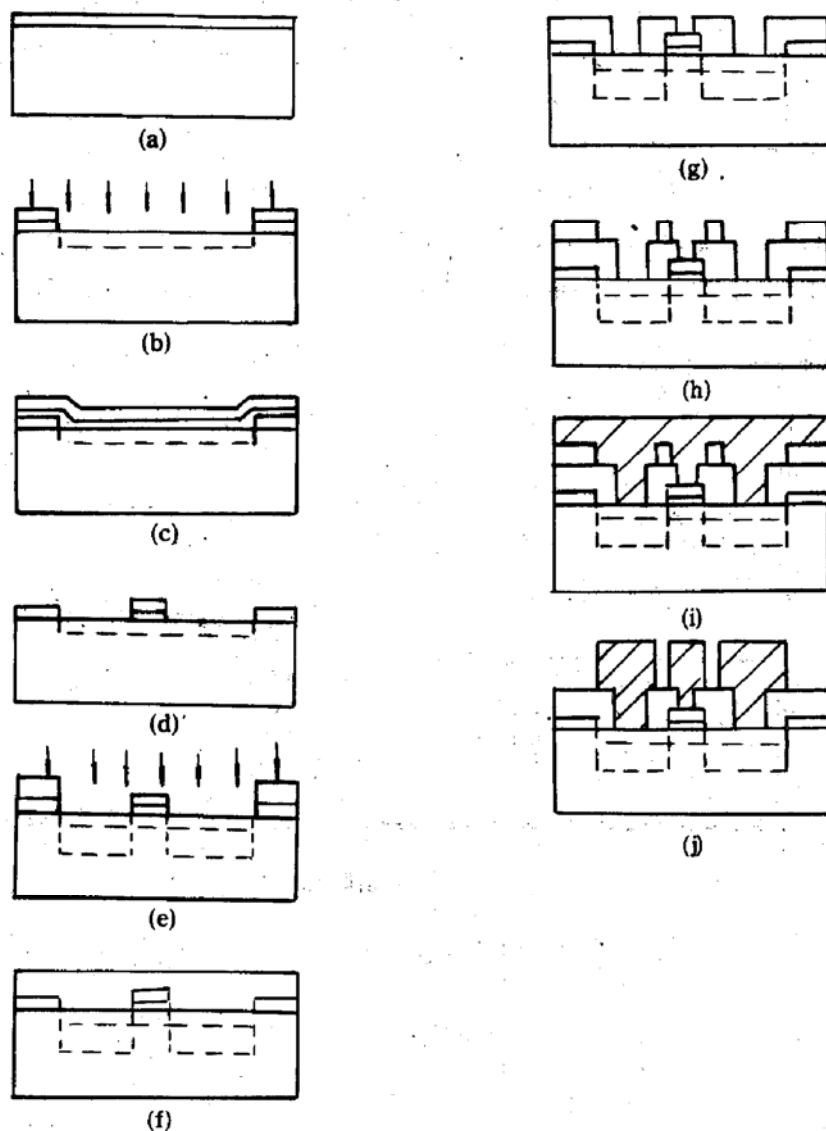


图 3 GaAs MESFET 的工艺流程

- a 溅射 AlN 薄膜 b 光刻有源区,沟道区离子注入
c 溅射栅材料 d 刻蚀栅图形 e 源漏区离子注入
f PECVD 淀积 SiON g 光刻接触孔 h 光刻引线、压焊点图形
i 蒸发 AuGeNi/Al j 剥离电极.

图 4 给出了晶体管肖特基结的反向特性曲线. 由图中可以看出,肖特基结的反向漏电流小,击穿特性好,反向击穿电压为 5V,相应的肖特基势垒高度 Φ_B 为 0.66eV. 图 5 给出了栅长为 $1\mu\text{m}$, 宽为 $5\mu\text{m}$ 的 GaAs MESFET 典型的输出特性曲线,晶体管的跨导约为 160mS/mm . 源漏击穿电压约为 5V.

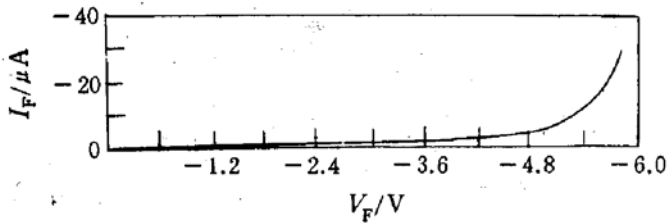


图4 肖特基结的反向特性

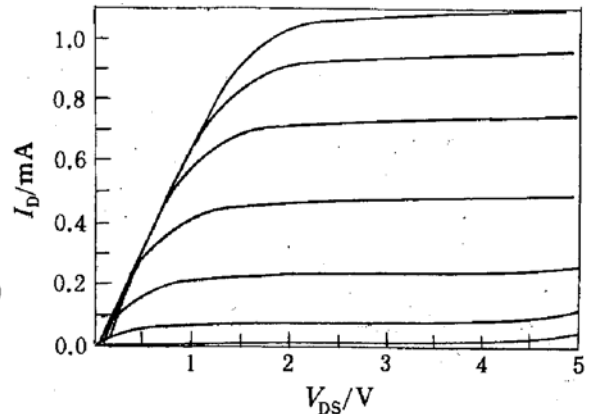


图5 GaAs MESFET 输出特性曲线

4 结论

(1) Mo/ZrN 与 TiW/ZrN 两种复合栅材料对比研究结果表明, Mo/ZrN 复合栅结构的电阻率比 TiW/ZrN 薄膜的电阻率低, 仅为 $18.5 \mu\Omega \cdot \text{cm}$. 经 800°C RTA 后, Mo/ZrN 薄膜与 GaAs 衬底的界面应力小, 明显优于 TiW/ZrN 材料.

(2) 首次采用 Mo/ZrN 双层材料作为 GaAs MESFET 的栅电极, ZrN 与 GaAs 衬底有良好的肖特基势垒特性和高温稳定性, 经 850°C 高温快速热退火, 其势垒高度为 0.66eV , 肖特基二极管的反向击穿电压大于 5V .

(3) 选择了适合的离子注入和退火条件: 沟道区离子注入的能量为 60keV , 剂量为 $5 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$; 其退火激活条件为 900°C 20 秒, 源漏区离子注入的能量为 120keV , 剂量为 $5 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$, 其退火激活的条件为 850°C 30 秒.

(4) 反应溅射 AlN 薄膜与 GaAs 界面应力小, 而 SiON 与 GaAs 的界面应力大, 淀积在 GaAs 衬底上的 SiON 薄膜退火时不能阻挡 Ga、As 的外扩散. 对 GaAs 的薄层电子密度, 电子迁移率而言, 用 AlN 作为离子注入 GaAs 快速热退火的保护层, 明显优于用 SiON 薄膜作保护层. 我们在研制 GaAs MESFET 的工艺中, 首次采用了这一新型的绝缘介质材料 AlN, 取得了较为满意的结果.

(5) 用自对准难熔氮化物栅(ZrN)工艺制备的 GaAs MESFET 场效应晶体管, 特性良好, 晶体管的跨导为 160mS/mm , 其栅漏反向击穿电压可达 5V .

参 考 文 献

- [1] L. C. Zhang *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1987, **50**(8):445.
- [2] X. W. Wu, L. C. Zhang *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1987, **50**(5):287.
- [3] 张利春, 高玉芝, 等, 半导体学报, 1989, **10**(3):161.
- [4] 张利春, 高玉芝, 半导体学报, 1989, **10**(4):241.
- [5] 张利春, 高玉芝, 等, 半导体学报, 1990, **11**(8):615.
- [6] 张利春, 高玉芝, 等, 半导体学报, 1990, **11**(7):556.
- [7] 周建平, 高玉芝, 宁宝俊, 等, 北京大学学报, 1991, **27**(5):629.
- [8] 郭良, 朱素珍, 张霞, 等, 半导体学报, 1990, **11**(10):780.

- [9] J. DeBaets *et al.*, 182nd The Electrochemical Meeting, 1992, **92-2**:384.
[10] 高玉芝, 尹红坤, 宁宝俊, 等, 固体电子学研究进展, 1993, **13**(4):312.
[11] F. Cerderia *et al.*, Phys. Review, 1972, **135**(2):15.

Investigation of Fully Ion Implantation Self-Aligned Refractory Metal Nitride Gate GaAs MESFET Technology

Gao Yuzhi, Zhang Lichun, Yin Hongkun and Ning Baojun

(Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871)

Received 10 October 1994, revised manuscript received 14 January 1995

Abstract The process technology of fully ion implantation self-aligned refractory metal nitride gate GaAs MESFET is investigated. The Mo/ZrN double films as gates and AlN for medium and passivation films of devices are used for the first time. The GaAs metal semiconductor field-effect transistors are fabricated for GaAs VLSI. The transconductance of transistor is about 160mS/mm. The reverse breakdown voltage V_{gd} is more than 5V.

PACC: 2520D, 2560S