

# 直流磁控溅射制备用于 GaAs MESFET 钝化的 AlN 的工艺研究

曹 昕 罗晋生

(西安交通大学微电子所 西安 710049)

陈堂胜 陈克金

(南京电子器件研究所 南京 210016)

**摘要** 室温下,用直流磁控反应溅射方法在  $N_2/Ar$  混合气体中淀积了 AlN 薄膜,所用衬底是 (100) 面的半绝缘 GaAs 单晶片. 研究了反应条件,如反应气压、反应气体配比、直流功率,对薄膜的物理性质和化学性质的影响. 为了得到适于 GaAs MESFET 钝化的薄膜,还对反应条件进行了优化

PACC: 6855

## 1 前言

为了提高 GaAs 器件的性能和可靠性,多年来人们一直在寻找适合于 GaAs 器件的钝化膜. 目前常用的钝化膜如  $SiO_2$ 、 $Si_3N_4$ 、 $Si_3N$  等,都不能完全满足 GaAs 器件的表面钝化的需要. AlN 膜由于其优良的特性,如化学性质稳定、能与 GaAs 形成良好的界面、热膨胀系数与 GaAs 匹配等,受到了研究者的关注<sup>[1]</sup>. AlN 薄膜可用多种方法制备,如反应离子束沉积 (reactive ion beam deposition)<sup>[2]</sup>、反应蒸发 (reactive evaporation)<sup>[3]</sup>、分子束外延 (MBE)<sup>[4]</sup>、等离子体增强化学气相淀积 (PECVD)<sup>[5]</sup> 等. 与以上方法相比,直流磁控反应溅射方法具有成本低、工艺兼容性好的优点,是一种很有前途的制备方法. 对于器件钝化来说,所关心的是钝化膜的密度、应力、生长过程对衬底的损伤等特性. 而对直流磁控反应溅射方法制备的 AlN 膜,缺乏对这方面特性的了解. 本文研究了反应条件与薄膜性质,如膜的成分、密度、应力、损伤等的关系. 以此为基础对反应参数进行了优化. 利用优化后的反应条件制备的 AlN 膜用于 GaAs MESFET 的钝化,钝化后器件的直流特性没有退化,并表现出较好的射频功率特性<sup>[6]</sup>.

曹 昕 男,1972 年出生,博士生

罗晋生 男,1950 年毕业于交通大学物理系,现为西安交大教授,中国电子学会会士,研究领域为 III-V 化合物半导体及器件、新型功率半导体器件、离子注入技术及椭圆偏光技术

陈堂胜 男,1964 年出生,高级工程师,从事 GaAs 微波器件及 MMIC 研究  
1998-02-27 收到,1998-04-13 定稿

## 2 实验

实验采用 LEYBOLD-HERAUS 公司的 Z550SM 磁控溅射台, 靶材为高纯铝 (99.99%), 在氮、氩气氛中反应溅射淀积 AlN 膜。所用衬底是 (100) 面的半绝缘 GaAs 单晶片。GaAs 衬底经丙酮、乙醇清洗后用  $H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O = 4 : 1 : 1$  的溶液在室温下腐蚀 3min, 去除表面损伤层。然后用  $NH_4OH : H_2O$  为 1 : 1 的溶液漂洗 1min, 去除表面氧化层。最后用氮气吹干, 送入反应室。用于方块电阻测试的样品在送入反应室前通过离子注入和快速退火在衬底表面形成有源层。样品的淀积条件见表 1。

样品的化学配比用俄歇能谱 (AES) 分析。样品的密度用晶体谐振法测量。样品的折射率用椭圆偏法测量, 测量波长为 632.8nm。样品的应力用 FSM 8800 激光应力测试仪测量。淀积过程对 GaAs 衬底的损伤通过比较 AlN 淀积前后衬底的方块电阻来研究<sup>[7]</sup>。淀积了 AlN 的样品在测量方块电阻前用 1M 的 NaOH 溶液去除 AlN 层。

表 1 AlN 薄膜淀积条件

靶材	高纯铝(99.99%)
靶预溅时间/h	3
直流功率/W	300~ 600
Ar 流量/sccm	1.0~ 5.0
N <sub>2</sub> 流量/sccm	1.0~ 10.0
反应气压/Pa	0.2~ 2
反应温度	室温
反应时间/min	20~ 120
膜厚/nm	80~ 200

## 3 实验结果及讨论

### 3.1 气压滞后现象及 N<sub>2</sub>/Ar 比对膜的成分的影响

在本文的实验范围内, 发现了明显的气压滞后现象<sup>[8]</sup>。图 1 是直流功率 400W, Ar 流量 2.0sccm 时的气压滞后曲线。如图, 保持 Ar 流量不变, 当 N<sub>2</sub> 流量从零开始增加时, 反应室气压上升很小, 此时处于状态 A。当 N<sub>2</sub> 流量加大到阈值 1 (2.0sccm) 时, 反应室气压发生突变, 此时进入状态 B。处于状态 B 时, 如加大 N<sub>2</sub> 流量, 反应室气压随 N<sub>2</sub> 流量增加线性上升。此时若减小 N<sub>2</sub> 流量, 反应室气压随之以相同斜率线性下降。当 N<sub>2</sub> 流量下降至阈值 1 后, 气压仍随之以相同斜率下降, 并不回到状态 A。此时进入状态 C。只有当 N<sub>2</sub> 流量下降到阈值 2 (1.5sccm) 时, 气压才再次发生突变, 又回到状态 A。

图 1 直流磁控反应溅射的气压滞后曲线

膜的 Al/N 比。表 2 是反应功率为 400W 时不同 N<sub>2</sub>/Ar 流量下薄膜的 Al/N 比。通过 AES 分析表明, 在本文的实验范围和 AES 分析的精度内, 状态 B 和状态 C 下淀积的薄膜 Al/N 比均为 4/3, 与反应时的 N<sub>2</sub>/Ar 流量无关。AES 分析还表明, 在状态 A 下淀积的薄膜 N 含量较低, 且随 N<sub>2</sub>/Ar 流量比的降低而下降。

用 AES 方法分析了不同反应条件下淀积的薄

表 2 不同 Ar, N<sub>2</sub> 流量下的 Al/N 比

Ar 流量 /sccm	N <sub>2</sub> 流量 /sccm	反应状态	Al/N 比
2.0	1.0	A	9/1
2.0	1.8	A	6/1
2.0	1.9	A	2/1
2.0	2.2	B	4/3
2.0	1.8	C	4/3
3.0	2.7	B	4/3

状态A 下定积的膜导电 从淀积原理和椭偏法测量折射率的结果(见 3.2 节)来说, 状态B、状态C 下定积的膜为介质膜

本文用反应溅射方法制备的AN 薄膜Al 含量偏高 这与其他研究者的结果一致<sup>[9, 10]</sup>.

### 3.2 反应气压对膜的密度和折射率的影响

实验中发现, 影响膜的密度和折射率的主要因素是反应气压 AN 膜的密度和折射率随反应气压变化而改变的曲线见图 2 由图 2 可见, 膜的密度和折射率均随反应气压的下降而增大 这是因为在较低气压下定积的膜致密, 而在较高气压下定积的膜疏松多孔 由气体分子运动理论可知, 一定温度下分子的平均自由程近似的与气压成反比 当气压下降时, 分子的平均自由程增加, 被淀积粒子在电场中获得的能量增大, 从而加大了其在衬底表面的迁移率 较大的表面迁移率使得被淀积粒子有可能淀积在能量较底的位置, 从而使形成的膜致密

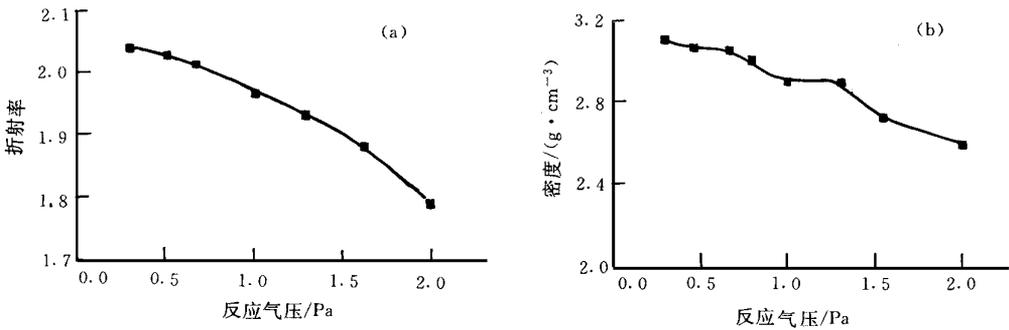


图 2 AN 膜的折射率(a)和密度(b)与反应气压的关系

### 3.3 反应条件对膜的应力的影响

直流反应溅射制备的AN 膜的应力主要由反应气压和通入N<sub>2</sub>/Ar 的流量比决定 膜的应力与反应气压、N<sub>2</sub>/Ar 流量比的关系曲线见图 3 在本文的实验范围内, 所有膜都呈压应力(compressive stress). 应力的大小随反应气压的增大或N<sub>2</sub>/Ar 流量比的减小而减小 这个结果与解释压应力的原子锤击模型(atomic peening model)<sup>[11, 12]</sup>相符 这个模型认为源自于靶上的高能粒子对正在生长的薄膜进行轰击, 从而使膜产生了压应力 当高能粒子的碰撞和反射增加时, 粒子的能量降低, 减小了轰击作用, 从而减小了压应力 而增加反应气压或减

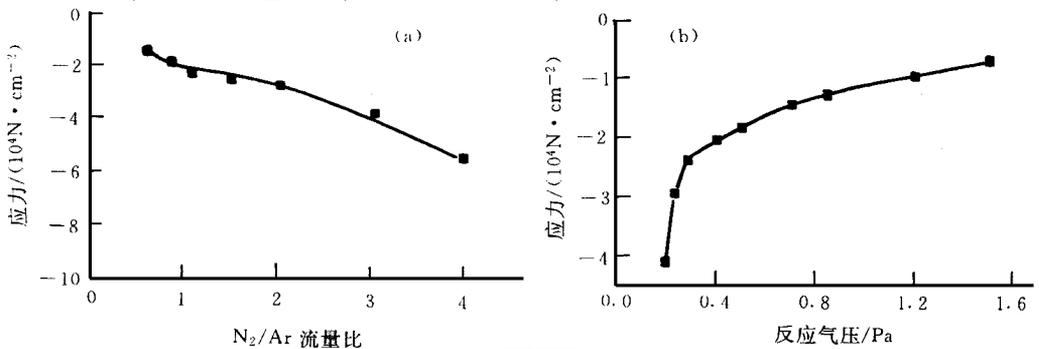


图 3 N<sub>2</sub>/Ar 流量比(a)和反应气压(b)与AN 膜应力的关系

小  $N_2$  在混合气体中的含量都能增加粒子的碰撞, 因此能减小压应力

### 3.4 淀积过程的工艺损伤

对于一个不良的钝化过程, 常常给 GaAs 衬底带来损伤, 从而使被钝化的 GaAs MESFET 器件特性退化. 因此, 在制备用于器件钝化的 AlN 薄膜时, 应降低工艺损伤

通过比较 AlN 薄膜淀积前后的方块电阻可以判断工艺损伤的大小. 若淀积过程中有较大的工艺损伤, 那么将在 GaAs 表面造成一个电阻率很大的损伤层, 从而增大样品的方块电阻. 工艺损伤越大, 损伤层就越厚, 样品的方块电阻也越大

对于反应溅射工艺来说, 造成工艺损伤的主要原因是溅射时可能产生从靶表面反射回来的高能粒子, 轰击衬底, 产生损伤<sup>[13]</sup>. 因此, 反应功率加大或反应气压减小时, 工艺损伤将增大

本文实验是在功率不太大(小于 600W)、气压不太低(大于 0.3Pa)的条件下进行的, 因此工艺损伤较小. 测量方块电阻的样品在淀积前方块电阻为  $1.2\text{k}\Omega/\square$ . 各种条件下淀积 AlN 薄膜后, 去掉薄膜再测衬底的方块电阻, 方块电阻值上升不超过 5%. 若要以减小工艺损伤为目标对反应条件进行优化, 则应采用外延衬底并增加方块电阻测试的精度, 以提高判定损伤的灵敏度

### 3.5 工艺条件的优化

#### 3.5.1 反应功率的确定

从反应溅射的工艺原理讲, 反应功率对膜的密度、应力、生长速率等都有影响. 为了保证一定的生长速率和膜的致密, 反应功率不能太小; 为了减小膜的应力和工艺损伤, 反应功率也不能太大. 因此, 反应功率的选择应在密度、应力、工艺损伤等之间折衷考虑. 但在我们的实验中, 考虑的主要是反应功率不能太大

由反应溅射的原理可知, 反应过程中将在靶表面形成一层 AlN 层. AlN 的导电性很差, 若加直流进行溅射将导致靶表面 AlN 层电荷积累. 当所加功率太大, 靶表面电荷将积累到一定程度而发生电弧放电. 电弧放电会使淀积的薄膜产生针孔. 因此, 用直流反应溅射淀积导电性差的介质膜时, 所加直流功率不能太大

在本文的实验系统中, 当反应功率加到 400W 时不会发生放电现象, 而且膜的密度与生长速率也能得到保证. 当功率加到 450W 时, 在有些反应条件下会有放电现象. 因此, 反应功率选用 400W.

#### 3.5.2 反应气压的选定

反应气压对膜的应力和密度均有影响. 由本文 3.2 节和 3.3 节知, 随着反应气压的减小, 膜的密度和应力将变大. 对于钝化膜, 要求它结构致密, 能防止水汽等对器件性能的影响. 另一方面, 如果钝化膜的应力太大, 将使器件的性能发生退化<sup>[14]</sup>. 因此, 在决定反应气压时要折衷考虑应力和密度的要求. 从图 2 可见, 当反应气压大于 0.6Pa 时密度随气压的上升减小较快. 从图 3 可见, 当反应气压小于 0.3Pa 时应力随气压的下降增大较快. 因此, 反应气压应在 0.3~0.6Pa 之间. 通过实验, 选定为 0.4Pa

#### 3.5.3 $N_2/Ar$ 流量的选定

$N_2/Ar$  流量比主要影响膜的成分、应力、淀积速率.  $N_2/Ar$  比越低, 膜的应力越小, 淀积速率也越高. 因此, 在保证膜的化学成分的前提下, 应尽可能地降低  $N_2/Ar$  比. 从图 1 可见, 当反应在状态 C 下进行, 既保证了膜的化学成分, 又保证了较低的  $N_2/Ar$  比. 为了使反应

在状态 C 下进行, 采取了如下方法: 反应时, 先通  $A_r$  预溅, 清洗靶表面 接着通入大量  $N_2$  并保持 5m in. 然后将  $N_2$  流量降至反应时设定的值 最后打开挡板, 开始淀积 当反应功率和反应气压确定后, 通过实验选定了在状态 C 下淀积的  $N_2/A_r$  流量,  $N_2$  流量: 2.0sccm;  $A_r$  流量: 2.5sccm.

## 4 结论

室温下, 用直流磁控反应溅射的方法在  $GaAs(100)$  衬底上淀积了  $AlN$  薄膜 研究了反应条件与薄膜特性的关系, 得到如下结论:

1.  $AlN$  薄膜的化学成分受气压滞后现象影响 要得到绝缘的介质膜必须在气压滞后曲线的状态 B、状态 C 下淀积 在这两种状态下, 淀积的薄膜的化学成分与  $N_2/A_r$  流量比无关

2.  $AlN$  薄膜的密度和折射率随反应气压的下降而增大

3.  $AlN$  薄膜的应力随反应气压的增大或  $N_2/A_r$  流量比的减小而减小 淀积的薄膜都呈压应力

4. 淀积过程的工艺损伤较小

根据用于钝化的需要, 对  $AlN$  薄膜的淀积条件进行了优化 得到了适合于  $GaAsMES-FET$  钝化的  $AlN$  膜的淀积条件, 反应功率: 400W、反应真空: 0.4Pa、 $N_2$  流量: 2.0sccm、 $A_r$  流量: 2.5sccm.

**致谢** 本研究是在南京电子器件研究所  $\phi 30mm$   $GaAs$  工艺线上完成的; 东南大学分析测试中心和中科院半导体研究所俄歇组提供了 AES 分析 在此深表感谢

## 参 考 文 献

- [1] L. S. Klingbeil and M. R. Wilson, *Solid State Electronics*, 1997, **41**: 429.
- [2] J. M. E. Harper, J. J. Cuomo, H. T. G. Hentzell, *Appl Phys Lett*, 1983, **43**: 547.
- [3] S. Yoshida, S. Misawa, A. Itoh, *Appl Phys Lett*, 1975, **26**: 461.
- [4] A. Yoshida, S. Misawa, Y. Fujii *et al*, *J. Vac Sci Technol*, 1979, **16**: 990.
- [5] Y. Someno, M. Sasaki, T. Hirai, *Thin Solid Films*, 1991, **202**: 333.
- [6] 曹昕, 罗晋生, 陈堂胜, 等, *固体电子学研究与进展*, 1998, **18**(2): 165~ 169.
- [7] R. J. Shul, M. L. Lovejoy, A. G. Baca *et al*, *J. Vac Sci Technol*, 1995, **A13**: 912.
- [8] 曹昕, 罗晋生, 陈堂胜, 陈克金, *半导体学报*, 1999, **20**(7), 539~ 542.
- [9] M. Penza, M. F. De Riccardis, L. M. Irenghi *et al*, *Thin Solid Films*, 1995, **259**: 154.
- [10] X. Li and T. L. Tansley, *J. Appl Phys*, 1990, **68**: 5369.
- [11] D. W. Hoffman and J. A. Thornton, *Thin Solid Films*, 1977, **45**: 378.
- [12] J. A. Thornton and D. W. Hoffman, *J. Vac Sci Technol*, 1985, **A3**: 576.
- [13] K. Tomiyaga, S. Yamamura, Y. Shinani *et al*, *Jpn J. Appl Phys*, 1983, **22**: 418.
- [14] E. Y. Chang, G. T. Cibuzar, K. P. Pande, *IEEE Trans Electron Devices*, 1988, **35**: 1412.

## Study of d c Reactive Sputtering Deposition AlN Film s Used for GaAsMESFET Passivation

Cao Xin, Luo Jinsheng

(*Institute of Microelectronics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049*)

Chen Tangsheng, Chen Kejin

(*Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing 210016*)

Received 27 February 1998, revised manuscript received 13 April 1998

**Abstract** AlN film s have been deposited on GaAs(100) wafers by d c magnetron reactive sputtering in a mixed Ar/N<sub>2</sub> discharge at room temperature. The effect of the preparation conditions (sputtering pressure, d c power and gas mixture) on the physical and chemical properties of the film s is investigated. In order to get good AlN film s used for GaAsMESFET passivation, the preparation condition is optimized.

**PACC:** 6855