

# AlN 薄膜对 TaN 薄膜电阻器功率影响研究

赵祖静,张怀武,唐晓莉

(电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川 成都 610054)

**摘要:**利用直流磁控溅射,在镍锌铁氧体基片上制作的 TaN 薄膜电阻器,受到铁氧体表面及内部结构特性差且导热系数低的影响,功率密度只能达到  $0.91 \text{ W/mm}^2$ 。利用射频磁控溅射,在铁氧体基片与薄膜电阻器间镀上  $1.5 \mu\text{m}$  厚的 AlN 薄膜缓冲层,可有效改善基片的表面特性及散热能力。带 AlN 薄膜缓冲层的 TaN 薄膜电阻器的功率密度可达  $3.76 \text{ W/mm}^2$ 。

**关键词:**磁控溅射;镍锌铁氧体基片;AlN 薄膜缓冲层;TaN 薄膜电阻器;功率密度

**中图分类号:**TN384;TM54;TB43 **文献标识码:**A

## Influence of AlN Thin Film on Power of TaN Thin Film Resistors

ZHAO Zujing, ZHANG Huaiwu, TANG Xiaoli

(State Key Lab. of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:**The power density of TaN thin film resistors which are prepared on Ni-Zn ferrite substrate by DC magnetron sputtering could just reach  $0.91 \text{ W/mm}^2$  owing to the bad surface and internal structure feature as well as the low thermal conductivity of the ferrite substrate. The AlN thin film buffer layer with thickness of  $1.5 \mu\text{m}$  was plated between ferrite substrate and thin film resistors by RF magnetron sputtering. The surface feature and the heat dissipation of the substrate can be improved effectively. The power density of TaN thin film resistors with the AlN thin film buffer layer can be up to  $3.76 \text{ W/mm}^2$ .

**Key words:**magnetron sputtering; Ni-Zn ferrite substrate; AlN thin film buffer layer; TaN thin film resistors; power density

### 0 引言

为实现微波元器件的小型化与集成化<sup>[1]</sup>,越来越多的科研工作者放弃传统的氧化铝、氧化铍基片,利用直流磁控溅射法,在镍锌铁氧体基片<sup>[2-3]</sup>上制备 TaN 薄膜电阻器<sup>[4]</sup>。与传统陶瓷基片相比,因镍锌铁氧体基片具有较高的介电常数( $\epsilon=13.0$ ),故其上制作的 TaN 薄膜电阻器可工作于很高的频率范围<sup>[5]</sup>(DC~30 GHz)。但镍锌铁氧体基片表面粗糙,平整度差,内部结构多孔洞,致密度差及胶导热系数低,因此,TaN 薄膜电阻器的功率密度不太高。这成为制约其面向实际应用的首要瓶颈。考虑到 AlN 材料<sup>[6]</sup>优良的导热系数,良好的陶瓷介电性能( $\epsilon=11.0$ ),致密的薄膜结构及成熟且类似的制作工艺<sup>[7-8]</sup>,本实验在传统制备工艺的基础上,利用射频磁控溅射法在镍锌铁氧体基片与 TaN 薄膜电阻器间,镀上一层约  $1.5 \mu\text{m}$  厚的 AlN 薄膜缓冲层,有效

改善了基片的表面特性及散热性能,使在缓冲层上制作的薄膜电阻器的功率密度有了大幅度的提升。

### 1 实验

#### 1.1 AlN 薄膜缓冲层的制备

采用射频磁控溅射制备 AlN 薄膜缓冲层。实验设备采用 TG-1 型 MF 磁控溅射系统,背底真空度为  $1 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ ,靶材使用纯度为 99.99% 的孪生 Al 靶( $310 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ),基片采用单面抛光的镍锌铁氧体基片( $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ )和单面抛光 Si 基片( $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ )。溅射气氛为高纯氮气和高纯氩气。溅射功率  $2400 \text{ W}$ ,Ar 气流量  $70 \text{ cm}^3/\text{min}$ , $\text{N}_2$  气流量  $30 \text{ cm}^3/\text{min}$ ,溅射气压  $0.96 \text{ Pa}$ ,靶基距离  $7 \text{ cm}$ ,基片温度  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ ,预溅射  $10 \text{ min}$ ,分别溅射  $30 \text{ min}$ 、 $60 \text{ min}$ 、 $120 \text{ min}$ 。

#### 1.2 TaN 薄膜电阻器的制备

采用反应直流磁控溅射制备 TaN 薄膜电阻器。

收稿日期:2016-01-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50972023)

作者简介:赵祖静(1992-),男,安徽马鞍山人,硕士生,主要从事铁氧体基 TaN 薄膜功率电阻器的性能的研究。张怀武(1959-),男,陕西人,博士、教授、博士生导师,“长江学者计划”特聘教授,国家“九七三”首席科学家,国家自然科学基金委创新群体带头人,主要从事磁电信息材料与器件、磁性纳米材料与芯片、射频与微波材料与器件及集成 LTCC/LTCF 器件方向的研究。

实验设备采用 BMS560B 型超高真空磁控溅射镀膜设备。背底真空度为  $3.8 \times 10^{-5}$  Pa。靶材使用纯度为 99.99% 的 Ta 靶、99.99% 的 Cu 靶,直径均为  $\varnothing 50$  mm。基片采用单面抛光的镍锌铁氧体基片 ( $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ )。溅射气氛为高纯氮气和高纯氩气。电源采用 Advanced Energy 公司的 MDX\_500 直流电源。光刻采用 BG401A 型光刻机。

图 1 为 TaN 薄膜电阻器表面尺寸图。Cu 电极制备:光刻完电极图形,直流磁控溅射镀 Cu 电极。Ar 气流量为  $50 \text{ cm}^3/\text{min}$ ,溅射气压 0.56 Pa,溅射功率 45 W,靶基距离 7.5 cm,预溅射 5 min,溅射 20 min。TaN 薄膜制备:光刻完薄膜图形,直流磁控溅射镀 TaN 薄膜。Ar 气流量为  $50 \text{ cm}^3/\text{min}$ , $\text{N}_2$  气流量为  $4 \text{ cm}^3/\text{min}$ ,溅射气压 0.62 Pa,溅射功率 45 W,靶基距离 7.5 cm,预溅射 5 min,溅射 15 min。

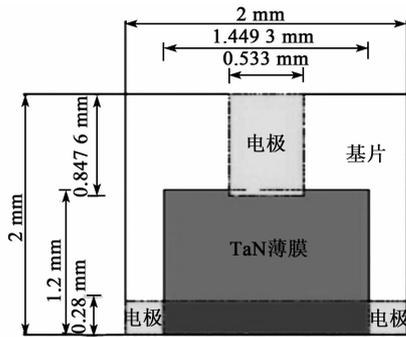


图 1 TaN 薄膜电阻器表面尺寸图

### 1.3 实验测试

利用 X 线衍射 (XRD) 仪对 AlN 薄膜材料相结构表征;利用台阶仪测量薄膜厚度;利用原子力显微镜 (AFM)、扫描电镜 (SEM) 对 AlN 薄膜和基片材料作表面及断层形貌分析;利用吉时利 2400 数字源表及二探针系统对薄膜电阻器功率密度进行测试分析。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 缓冲层相结构表征及缓冲层薄膜生长速度分析

对于在同批次,相同实验参数下, Si 基片上生长的 AlN 薄膜做 XRD 相结构分析。图 2 为缓冲层

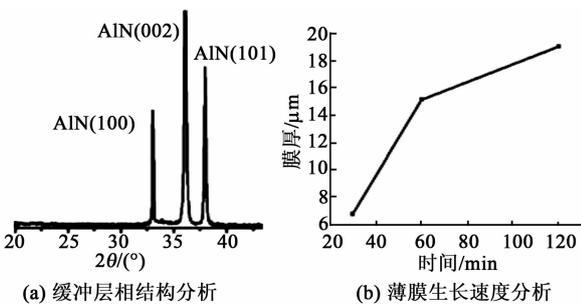


图 2 缓冲层相结构及薄膜生长速度分析

相结构及薄膜生长速度分析。由图 2(a) 可见,在本实验工艺参数下制备得到的 AlN 薄膜材料具有良好的 AlN(002) 晶向结构。由图 2(b) 可看出,不同时间阶段薄膜生长速度不同。在 30~60 min 时,薄膜生长最快,60 min 后薄膜生长速度明显放缓。

### 2.2 AlN 缓冲层对基片表面特性的改善

不同厚度的薄膜对基片表面的形貌改善具有不同的影响。不同厚度的薄膜缓冲层对于镍锌铁氧体基片表面的形貌影响 AFM 测试 ( $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ ) 如图 3 所示。图中, RMS 为表面粗糙度,  $t$  为时间,  $h$  为薄膜厚度。

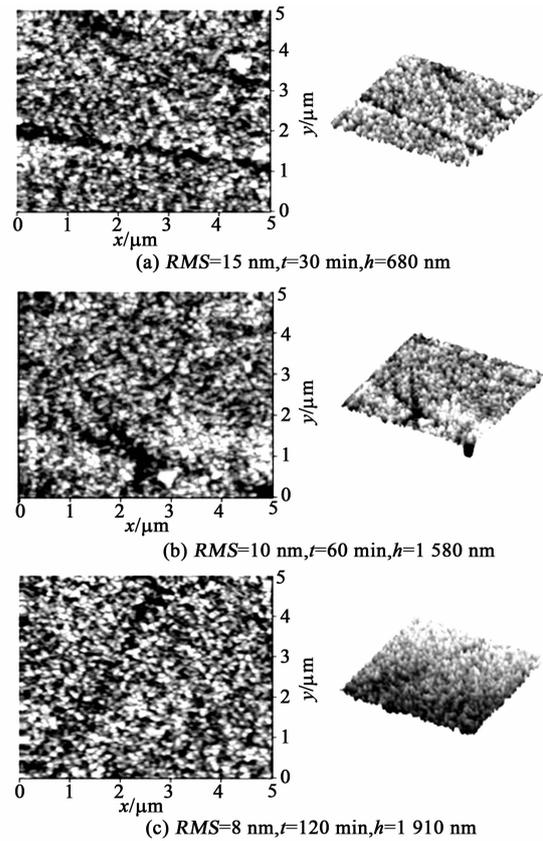


图 3 不同厚度缓冲层对基片表面改善 AFM 分析

由于基片温度  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ , 加上溅射时拥有的初始能量, 成膜粒子拥有很高的自由能。在薄膜生长<sup>[9]</sup>的过程中, 易被铁氧体表面的缺陷能量陷阱捕获。成膜粒子的自由能越高被捕获的几率和速率越大。当捕获速率大于薄膜的层状或岛状生长速率<sup>[10]</sup>时, 便可在一定程度上弥补缺陷, 改善铁氧体基片的表面特性。薄膜较薄时 (680 nm) 受基片缺陷影响较大,  $\text{RMS} = 15 \text{ nm}$ ; 薄膜较厚时受基片缺陷影响减弱, 薄膜再变厚时对基片表面改善不是特别明显。射频 (RF) 磁控溅射 60 min, 1 580 nm 厚的缓冲层,  $\text{RMS} = 10 \text{ nm}$ , 已达到改善表面的效果。

此外, AlN 薄膜缓冲层内部结构致密, 导热系数  $\lambda=380 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。充分弥补了镍锌铁氧体基片内部疏松多孔, 导热系数低的不足, 如图 4 所示。

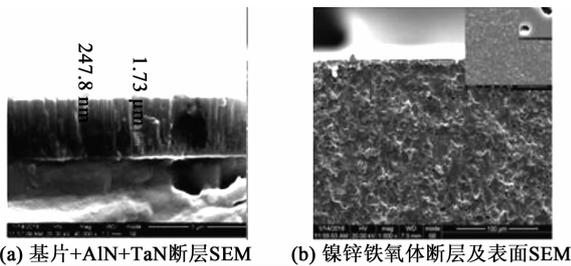


图 4 铁氧体基片断层与 AlN 薄膜断层 SEM 分析

### 2.3 AlN 缓冲层对于 TaN 薄膜电阻器的功率密度性能提升

图 5 为带 AlN 缓冲层上生长的 TaN 薄膜与传统工艺生长薄膜 AFM 分析。与传统工艺在镍锌铁氧体基片上镀膜相比, 带有缓冲层的基片上生长的 TaN 薄膜平整均匀, 几乎不受铁氧体基片表面的影响。TaN 薄膜的质量远高于在裸基片上生长的情况。这不仅有利于提高器件整体的稳定性及散热性, 还有利于精确控制 TaN 薄膜制作工艺参数。这为制备功率密度特性优良的薄膜电阻器打下了良好的基础。

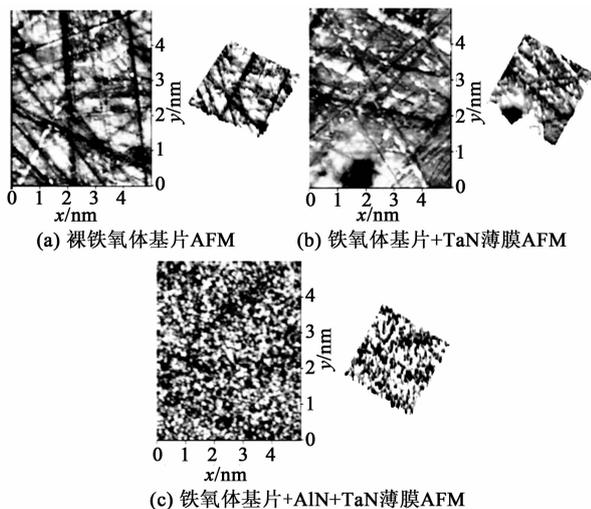


图 5 带 AlN 缓冲层上生长的 TaN 薄膜与传统工艺生长薄膜 AFM 分析

利用吉时利 2400 数字源表和二探针测试系统测试薄膜电阻器的功率密度, 其中薄膜电阻器面积为  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。设置数字源表输出电流, 测试负载功率。在 30 min 内电阻器阻值变化不超过  $\pm 5\%$ , 则认为负载工作正常。再逐步提高输出电流, 记录最高可承受的功率密度, 直到电阻器烧毁。测试结果如表 1 所示。其中 RF 磁控溅射 120 min, 1 910 nm 厚 AlN 缓冲层上的 TaN 薄膜电阻器的最高功率密度

可达  $4.11 \text{ W}/\text{mm}^2$ , 平均值达  $3.76 \text{ W}/\text{mm}^2$ 。

表 1 不同厚度缓冲层上薄膜电阻器功率密度测试

溅射时间/ min	功率密度/ $(\text{W}/\text{mm}^2)$			
	1 批次	2 批次	3 批次	平均值
0	0.87	0.92	0.95	0.91
30	2.15	1.97	2.23	2.12
60	3.28	3.83	3.47	3.53
120	3.56	4.11	3.62	3.76

### 3 结束语

AlN 薄膜缓冲层解决了铁氧体基片的表面特性, 在其上生长的 TaN 薄膜质量显著提高。AlN 薄膜缓冲层能改善镍锌铁氧体基片上 TaN 薄膜电阻器的功率密度特性, 且随着薄膜厚度的增加改善效果越好。但当缓冲层膜厚达到一定程度时, 其对功率密度的改善已变得微弱。介质缓冲层厚度的增加会影响基片的介电性能, 从而影响频率特性。选择  $1.5 \mu\text{m}$  厚的 AlN 薄膜缓冲层可较好的改善镍锌铁氧体基片上 TaN 薄膜电阻器的功率密度性能。

#### 参考文献:

- [1] 计量. 铁氧体基 TaN 薄膜及微波集成负载, 隔离器研制[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [2] 王超杰. TaN 薄膜材料及微波功率薄膜电阻器研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [3] 向阳. TaN 微波功率薄膜电阻器制备及性能研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [4] KANG S M, YOON S G, YOON D H, et al. Control of electrical resistivity of TaN thin films by reactive sputtering for embedded passive resistors[J]. Thin Solid Films, 2008, 516(11): 3568-3571.
- [5] 黄子宽, 张怀武, 唐晓莉. CAS 玻璃釉对 TaN 薄膜电阻器功率影响研究[J]. 压电与声光, 2015, 37(3): 1-4. HUANG Zikuan, ZHANG Huaiwu, TANG Xiaoli. Influence of power on TaN thin film resistors by CAS glass glaze[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2015, 37(3): 1-4.
- [6] 程伟. Si(111) 衬底上 AlN 材料的生长与研究[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- [7] 毕晓猛. 氮化铝压电薄膜的反应磁控溅射制备与性能表征[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014.
- [8] 刘丹瑛. 射频磁控溅射制备 AlN 薄膜及其性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [9] 陆杭军, 吴锋民. 非均匀基底上三维薄膜生长的模拟研究[J]. 物理学报, 2006, 55(1): 1-6. LU Hangjun, WU Fengmin. Simulation of three dimensional thin film growth on inhomogeneous substrate[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(1): 1-6.
- [10] 戴伟玮. 磁控溅射薄膜生长的计算机模拟研究[D]. 上海: 复旦大学, 2009.