

面心立方结构 TaN<sub>δ</sub> 薄膜功率电阻研究代波<sup>1</sup>, 倪经<sup>2</sup>

(1. 西南科技大学 材料科学与工程学院, 四川绵阳 621010;

2. 西南应用磁学研究所, 四川绵阳 621000)

**摘要:** TaN 薄膜电阻由于具有高的微波承受功率、低的电阻温度系数以及良好的化学稳定性, 是目前常用的功率电阻。在 Ar/N<sub>2</sub> 混合气氛下, 利用直流反应溅射制备了面心立方结构的 TaN 薄膜功率电阻。实验发现, 当 Ta/N 原子比在 0.9~1.2 之间时, 可以形成比较好的面心立方结构 TaN。其电阻温度系数约为 -1.86 %/°C, 对于 6mm (长) × 0.3mm (宽) × 0.25μm (厚) 的薄膜电阻, 微波承受功率超过 3W, 而 Ta 薄膜电阻承受微波功率小于 2W。

**关键词:** 功率电阻; TaN 薄膜; 承受功率

中图分类号: O484.4

文献标识码: B

文章编号: 1001-3830(2010)05-0037-04

## Study on Face Centered Cubic TaN Film Power Resistor

DAI Bo<sup>1</sup>, NI Jing<sup>2</sup>

1. School of Materials Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

2. Southwest Institute of Applied Magnetics, Mianyang 621000, China

**Abstract:** TaN has been frequently used for fabricating power resistor because of its high microwave power endurance, low temperature coefficient of resistance (TCR) and good corrosion resistance. In this study, face centered cubic (fcc) TaN films were fabricated by using DC reactive magnetron sputtering in Ar/N<sub>2</sub> mixed gas atmosphere. It was found that when the Ta/N atomic ratio was between 0.9 and 1.2, fcc TaN films were formed and temperature coefficient of resistance (TCR) is as low as -1.86 %/°C. The power endurance is beyond 3W while less than 2W for Ta film resistors.

**Key words:** power resistor; TaN film; power endurance

## 1 引言

微带隔离器是微波集成电路系统中不可缺少的模块之一, 在电子干扰、卫星定位、探测、跟踪、通讯、控制等系统中的微波混合集成电路中有广泛的应用。随着各类军用武器向远距离、短时间、选择性打击方向发展, 对微带隔离器的承受功率提出了更高的要求。TaN<sub>δ</sub>(δ≠0)薄膜电阻是目前微带隔离器最常用的功率电阻, 具有比较大的电阻率, 小的电阻温度系数(TCR)、低的压控电阻(VCR)、良

好的化学抗腐蚀性以及大的微波承受功率等优点<sup>[1~4]</sup>。然而, TaN<sub>δ</sub>具有 9 种不同的晶体结构<sup>[5]</sup>, 而且不同结构的微波承受功率差别巨大, 其中简单六方结构的 δ-TaN、ε-TaN 以及面心立方的 TaN 具有较佳的微波功率承受能力。大量文献报道, 在制备上述三种 TaN 相时, 往往需要基片加热或高温退火后处理等复杂工艺<sup>[6~8]</sup>。在本研究中, 我们探索通过简单的制备手段(无基片加热和退火后处理), 以制备出面心立方结构的 TaN<sub>δ</sub>薄膜功率电阻薄膜。

## 2 实验

采用日本真空 MB04-9307 型直流磁控溅射系

收稿日期: 2010-03-26 修回日期: 2010-06-04

基金项目: 四川省青年基金资助项目(09ZQ026-002)

作者通信: E-mail: bodai31@vip.sina.com

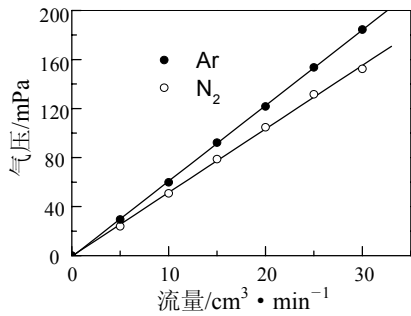


图1 溅射气压与Ar气和N<sub>2</sub>气流量的关系

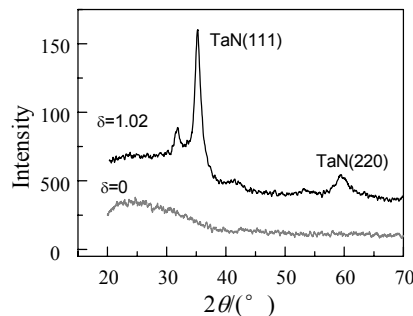


图2 玻璃基片/TaN<sub>δ</sub>(200 nm)样品的XRD谱

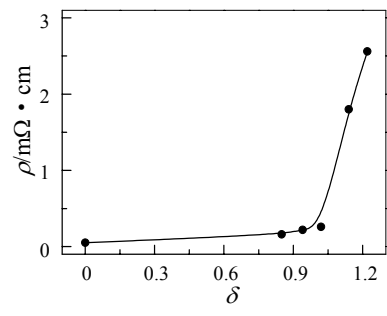


图3 TaN<sub>δ</sub>功率电阻的电阻率随N含量的变化

统, 制备三种系列样品, 系列 I: 玻璃基片/TaN<sub>δ</sub>(≥200nm); 系列 II: 铁氧体基片/TaN<sub>δ</sub>(250 nm)/Cu(800nm); 系列 III: 铁氧体基片/TaN<sub>δ</sub>(t)/Cr(200nm)/Cu(800nm), 其中 δ 从 0 增至 1.22, 而 t 从 40nm 增至 200nm。系列 I 样品用于 TaN<sub>δ</sub> 薄膜结构表征; 系列 II 样品被光刻成 0.3mm×6mm 的 TaN<sub>δ</sub> 电阻条, 用于测量 TaN<sub>δ</sub> 的电阻率和电阻率的温度系数; 通过电镀 2μm 的 Cu、光刻电路图形、电镀 2μm 的 Au 以及温度老化, 系列 III 样品应用于微带隔离器, 测试 TaN<sub>δ</sub> 功率电阻的直流功率和微波承受功率。

溅射系统的本底真空优于 50 μPa, 采用 Ar 和 N<sub>2</sub> 的混合气氛并在室温下制备样品。测定靶材溅射速率, 通过改变镀膜时间来控制 TaN<sub>δ</sub> 薄膜的厚度; TaN<sub>δ</sub> 的成分由 Leica S440 扫描电镜测定, 采用荷兰 X'Pert 的 X 射线衍射(XRD)多晶衍射仪观察样品相结构, X 光的光源采用 Kα<sub>1</sub>(波长 0.15406nm)。

### 3 结果与分析

磁控溅射系统的溅射气压与通入气体的流量近似为线性叠加关系。图 1 给出了 Ar 气和 N<sub>2</sub> 气的流量对成膜室气压的影响, 其中直线是对数据点线性拟合的结果。由图可以拟合出溅射气压与溅射气体流量之间的关系:

$$P = 6.166 F_{Ar} + 5.187 F_{N_2} \quad (1)$$

其中, 气压的单位是 Pa, 流量的单位为 cm<sup>3</sup>/min, F<sub>Ar</sub> 为 Ar 气的流量, F<sub>N<sub>2</sub></sub> 为 N<sub>2</sub> 气的流量。通过 (1) 式, 可以准确设计溅射的气压和各类溅射气体的分压。

TaN<sub>δ</sub> 的 N 含量 δ 与实验制备条件的关系如表 1 所示。在溅射气压约为 0.2Pa 的情况下, N 含量随 N<sub>2</sub> 与 Ar 流量比的增加而增加。因此, 通过调节 N<sub>2</sub> 流量, 我们可制备不同 N 含量的样品。

表 1 样品制备条件与 N 含量(δ)

样品编号	Ar 流量:N <sub>2</sub> 流量	溅射气压/Pa	N 含量(δ)
1	17.8:17.8	0.20	1.22
2	17.8:16.8	0.19	1.14
3	17.8:15.8	0.19	1.02
4	17.8:14.8	0.18	0.94
5	17.8:13.8	0.18	0.85

图 2 是玻璃基片/TaN<sub>δ</sub>(200 nm)样品的 XRD 谱, 其中 δ 分别为 0 和 1.02。从图中可以看出, Ta 薄膜的 XRD 谱没有出现衍射峰, 为非晶态, 这与文献[5]的结论吻合。TaN<sub>1.02</sub> 薄膜的衍射峰中, 位于 35.3°和 59.4°的两个衍射峰对应 fcc 织构 TaN 的(111)和(220)的晶面, 而且与其它衍射峰比较, (111)晶面产生的衍射强许多。因此, 我们制备的 TaN<sub>1.02</sub> 薄膜主要具有 fcc 织构, 而且其生长面为(111)晶面, 根据布拉格公式计算, TaN<sub>1.02</sub> 薄膜的晶格常数为 0.44 nm。在 31°左右的衍射峰可能为 TaN<sub>0.8</sub> 六方相的(001)峰(PDF 卡片号: 251279)。

TaN<sub>δ</sub> 薄膜电阻的电阻率 ρ=RS/L, 其中 S 是电阻条的横截面, 为 0.3mm×溅射速率×溅射时间; L 是电阻条的长度, 为 6mm。由于电阻条的阻值均超过 1kΩ, 远远大于只有几欧姆的接触电阻, 因此该测量方式获得的电阻率是比较准确的。图 3 显示了 N 含量对 TaN<sub>δ</sub> 功率电阻的电阻率的影响。总体上, 随着 N 含量的增加, TaN<sub>δ</sub> 的电阻率变大。在 δ<1 时, 随着 N 含量的增加, TaN<sub>δ</sub> 的电阻率缓慢上升, TaN<sub>1.02</sub> 的电阻率(0.26 mΩ·cm)仅比 Ta 的电阻率(0.05 mΩ·cm)大了 4 倍; 当 δ>1 时, 随 N 含量的增加, TaN<sub>δ</sub> 的电阻率迅速变大, TaN<sub>1.22</sub> 的电阻率(2.56 mΩ·cm)增至 Ta 电阻率的 50 倍。上述结果与文献数据相吻合<sup>[9]</sup>。

通过在 TaN<sub>δ</sub> 功率电阻的两端施加一个直流电压, 并测量其电流, 可以测试微带隔离器的功率电

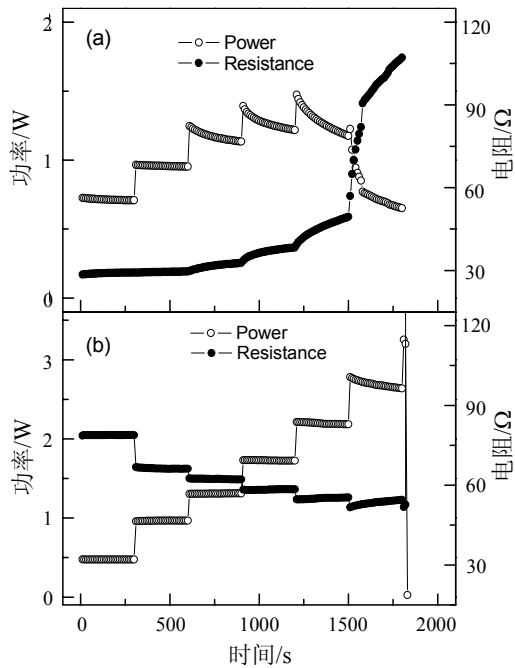


图4 微带隔离器(a)Ta、(b)TaN<sub>1.02</sub>功率电阻直流承受功率的测试曲线

阻承受的直流功率。为了测试 TaN<sub>δ</sub> 薄膜电阻在直流功率下的稳定性,电压改变的间隔时间都大于 5min。图 4 给出了微带隔离器 Ta 和 TaN<sub>1.02</sub> 功率电阻的直流承受功率的测试曲线。图中不仅给出了测量过程中承受的功率,也给出了 Ta 或 TaN<sub>1.02</sub> 的电阻的变化。从图中可以看出, TaN<sub>1.02</sub> 功率电阻在承受 2.78W 的直流功率时,其阻值依然比较稳定;而 Ta 功率电阻仅承受 1.4W 的直流功率,其阻值即明显增大。值得注意的是, Ta 薄膜电阻随着承受功率的增加而增加,而 TaN<sub>1.02</sub> 薄膜电阻随着承受功率的增加而减小。这可以解释为,随着承受功率的增加, Ta 或 TaN<sub>1.02</sub> 温度会上升。由于 Ta 电阻率的温度系数为正,所以其阻值上升;而 TaN<sub>1.02</sub> 电阻率的温度系数为负<sup>[3]</sup>,所以其阻值下降。微波承受功率测试表明, Ta 的最高微波承受功率接近 2W,而 TaN<sub>1.02</sub> 的最高微波承受功率为 3.1W。应该指出的是, Ta 微带隔离器由二端输入功率,而 TaN<sub>1.02</sub> 微带隔离器由三端输入功率,后一种测量方式对微波功率的承受能力要求更高。

对于最高直流承受功率的要求是,器件加载该功率,在 5min 内其功率电阻的阻值改变小于 10%。图 5 为微带隔离器 TaN<sub>δ</sub> 的最高直流承受功率与 N 含量(δ)的关系,图中曲线是对数据点的拟合。从图中可以看出, Ta 薄膜电阻的最高直流承受功率为 1.39W,而 TaN<sub>1.02</sub> 为 2.78W。随着 N 的含量由 0

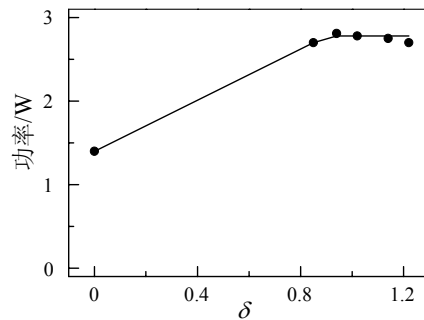


图5 TaN<sub>δ</sub> 最高直流承受功率随 N 含量的变化

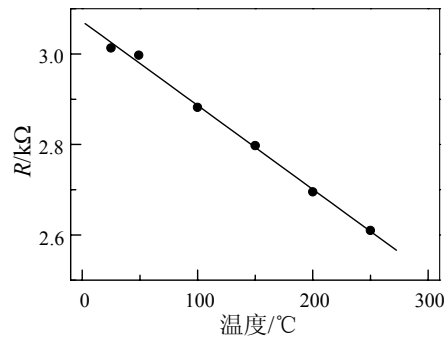


图6 TaN<sub>1.02</sub> 功率电阻的温度曲线

增至 0.94, TaN 最大承载的直流功率直线上升;当 0.94<δ<1.22 时, TaN<sub>δ</sub> 功率电阻的最高直流承受功率几乎保持不变。

通过加热 TaN<sub>1.02</sub> 长方形电阻条,可以获得 TaN<sub>1.02</sub> 薄膜电阻的温度曲线,如图 6 所示。图中的直线是对数据点的线性拟合,该直线的斜率为 -1.86‰,因此 TaN<sub>1.02</sub> 电阻率的温度系数为 -1.86‰/°C。负的温度系数正是 TaN<sub>1.02</sub> 电阻的典型特征之一。然而,由于接触电阻随温度显著变化,此数值远远高于文献所给的 TaN 电阻率的温度系数(-0.075±0.05‰/°C)<sup>[9,10]</sup>。为了获得更高的精度,必须采用四探针电阻测量方法。表 2 列举了面心立方 TaN<sub>1.02</sub> 和非晶态 Ta 薄膜功率电阻的制备条件和主要性能指标。

表 2 TaN<sub>1.02</sub> 和 Ta 薄膜功率电阻的比较

	TaN <sub>1.02</sub>	Ta
Ar 流量: N <sub>2</sub> 流量	17.8: 15.8	25: 5
溅射气压/Pa	0.19	0.18
溅射速率/nm·min <sup>-1</sup>	4.2	~4.8
织构	fcc	非晶态
电阻率/mΩ·cm <sup>-1</sup>	0.26	0.05
电阻率温度系数*/‰·°C <sup>-1</sup>	-1.86	2.02
最高直流承受功率/W	2.78	1.39
最高微波承受功率**/W	3.1	<2.0

\* 测量精度不够,需要采用四探针测量方法

\*\* Ta 微带隔离器由 2 端输入微波功率,而 TaN<sub>1.02</sub> 微带隔离器由 3 端输入微波功率,后一种测量方式对微波功率的承受能力要求更高

## 4 结论

与 Ta 薄膜电阻比较, TaN<sub>1.02</sub> 薄膜电阻可以承受更大的直流电流或微波功率, 而且其具有负的非常小的电阻率温度系数<sup>[10]</sup>和超强的热稳定性(低于 600℃, TaN<sub>1.02</sub> 薄膜几乎没有扩散)<sup>[11]</sup>, 这有利于微带隔离器的温度稳定性。由于 TaN<sub>1.02</sub> 薄膜具有确定的晶体结构和生长方向, 可以在理论上模拟 TaN<sub>1.02</sub> 薄膜的生长过程和与其它膜层或基片产生的结合力。另外需要指出, 为了进一步提高功率电阻的承受功率, 必须制备出 δ-TaN, 这就涉及基片加热或高温退火后处理。

### 参考文献:

- [1] Shin C S, Gall D, Desjardins P, et al. Growth and physical properties of epitaxial metastable cubic TaN(001) [J]. Appl Phys Lett, 1999, 75(24): 3808-3810.
- [2] Riekkinen T, Molarius J, Laurila T, et al. Reactive sputter deposition and properties of Ta<sub>x</sub>N thin films [J]. Microelectron Eng, 2002, 64(1-4): 289-297.
- [3] Kim D, Lee H, Kim D, et al. Electrical and mechanical properties of tantalum nitride thin films deposited by reactive sputtering [J]. J Cryst Growth, 2005, 283(3-4): 404-408.
- [4] Chen J K, Chan C H, Kuo S W, et al. TaN<sub>x</sub> thin films as

(上接 36 页)

逐渐上升, 而  $H_c$  先下降后上升, 导致 NiCuZn 铁氧体的磁导率呈先上升后下降的趋势;

(3) 在大直流偏置磁场作用下, 所有 Co<sup>2+</sup> 替代样品的磁导率都呈下降趋势,  $H_c$  对铁氧体增量磁导率的影响大于  $B_s$  的影响;

(4) 在偏置电流作用下, Co<sup>2+</sup> 替代 NiCuZn 铁氧体样品的品质因数主要由其矫顽力大小所决定, 具有最低矫顽力的 X3 样品在任何偏置磁场作用下其品质因数都最高。

### 参考文献:

- [1] 钟惠, 张怀武. 烧结温度对掺 Mn 的 NiZn 铁氧体磁性能的影响[J]. 磁性材料及器件, 2004, 35(2):14-16.
- [2] 陆明岳. 软磁铁氧体材料直流叠加特性的研究[J]. 磁性材料及器件, 2000, 31(4):7-12.
- [3] Jean J H, Lee C H. Low-fire Nio-Cuo- Zno ferrite with Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [J]. J Appl Phys, 1999, 38(6): 3508-3512.
- [4] Nakano. The study of low temperature sintering NiCuZn ferrites for multilayer ferrite chip[A]. International Conference on Ferrites[C].2005, 25-27.
- [5] Seema V, Pradhan S D, Renu P. A novel low-temperature synthesis of nanosized NiZn ferrite [J]. J Am Ceram Soc, 2005, 88(9): 2597-2599.
- [6] Hsu J Y, Ko W S, Chen C J. The effects of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> on

copper barriers sputter-deposited at various NH<sub>3</sub>-to-Ar flow ratios [J]. Microelectron Eng, 2009, 86 (3): 414-420.

- [5] Terao N. Structure of Tantalum Nitrides [J]. Jpn J Appl Phys, 1971, 10(2): 248-259.
- [6] Cuong N D, Kim D J, Kang B D, et al. Characterization of tantalum nitride thin films deposited on SiO<sub>2</sub>/Si substrates using dc magnetron sputtering for thin film resistors [J]. J Electrochem Soc, 2006, 153(2): G164-167.
- [7] Lin J Y, Wang Y Y, Wan C C, et al. Impurities induced localized corrosion between copper and tantalum nitride during chemical mechanical planarization [J]. Electrochem Solid-State Lett, 2007, 10(1): H23-26.
- [8] Choi H, Jung S J, Park H, et al. Formation of TaN nanocrystals embedded in silicon nitride by phase separation methods for nonvolatile memory applications [J]. Appl Phys Lett, 2007, 91(5): 052905-052905-3.
- [9] Wang Z L, Yaegashi O, Sakae H, et al. Suppression of native oxide growth in sputtered TaN films and its application to Cu electroless plating [J]. J Appl Phys, 2003, 94(7): 4697-4710.
- [10] Gerstenberg D, Calbick C J. Effects of nitrogen, methane and oxygen on structure and electrical properties of thin tantalum films [J]. J Appl Phys, 1964, 35(2): 402-407.

**作者简介:** 代波 (1976 -), 四川绵阳市人, 凝聚态物理博士, 副教授, 主要从事低维功能薄膜材料研究。

sintering of NiZnCu ferrite [J]. IEEE Trans Magn, 1995, 31(6): 3994-3996.

- [7] Yue Z, Zhou J, Li L T, et al. Synthesis of nanocrystalline NiCuZn ferrite powders by sol-gel auto-combustion method [J]. J Magn Mater, 2000, 208: 55-60.
- [8] Jean J H, Lee C H, Kou W S. Effects of lead(II) oxide on processing and properties of low-temperature- Cofirable Ni-Cu-Zn ferrite [J]. J Am Ceram Soc, 1999, 82(2): 343-350.
- [9] 韩志全. 叠层式电感及低温烧结铁氧体的研发进展[J]. 磁性材料及器件, 2004, 38(6):6-10.
- [10] Nam J H, Jung H H, Shin J Y, et al. Methanol and proton transport control by using layered double hydroxide nanoplatelets for direct methanol fuel cell [J]. IEEE Trans Magn, 1995, 31(6):3985.
- [11] Zhang H J, Jia X L, Yao Xi, et al. Manufacture of ZnCo substituted Y-type barium hexagonal ferrites by citrate precursor route and their microwave properties [J]. J Rare Earths, 2004, 22(3):338-343.
- [12] Wang S F, Thomas C K, Yang C F. Effects of processing on the densification and properties of low fire NiCuZn ferrites [J]. Scripta Materialia, 2000, 43(3): 269-274.
- [12] 黄伟, 何华辉, 冯则坤, 等. 高磁导率、高直流叠加 MnZn 软磁铁氧体材料研究[J]. 磁性材料及器件, 2005, 36(6):27-29.

**作者简介:** 李旭哲 (1984 -), 男, 硕士研究生。研究方向为电子信息材料与元器件。