

· 电子信息材料与器件 ·

## 掺Al对TaN薄膜微结构及电性能的影响

蒋洪川, 王超杰, 张万里, 向阳, 司旭, 彭斌, 李言荣

(电子科技大学电子薄膜与集成器件国家重点实验室 成都 610054)

**【摘要】**采用反应直流磁控溅射法在 $Al_2O_3$ 陶瓷基片上制备TaAlN薄膜,通过调节复合靶Al/Ta面积比调节Al掺杂量,研究了Al/Ta面积比对TaAlN薄膜微结构及电性能的影响。XRD结果表明,TaN薄膜中掺杂Al可在 $2\theta$ 为 $38.5^\circ$ 和 $65.18^\circ$ 处分别有立方结构的AlN(101)和AlN(202)相出现。随Al/Ta面积比的增大,TaAlN薄膜的沉积速率、电阻率、方阻以及TCR绝对值逐渐增大。当Al/Ta面积比为零时,TaN薄膜的电阻率和TCR绝对值分别为 $247.8\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$ 和 $12\ \text{ppm}/^\circ\text{C}$ 当Al/Ta面积比增大到29%时,TaAlN薄膜的电阻率和TCR绝对值分别增大到 $2560\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$ 和 $270\ \text{ppm}/^\circ\text{C}$

**关键词** Al掺杂; 磁控溅射; TaN薄膜; TCR

中图分类号 TB43; TN6

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.03.025

## Influences of Aluminum Doping on the Micro-Structures and Electrical Properties of TaN Thin Films

JIANG Hong-chuan, WANG Chao-jie, ZHANG Wan-li, XIANG Yang, SI Xu, PENG Bin, and LI Yan-rong

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

**Abstract** TaAlN thin films were deposited on  $Al_2O_3$  substrates by reactive DC magnetron sputtering. The content of Al doping in TaN thin films was controlled by adjusting Al/Ta area ratios of the composite target. The influences of Al/Ta area ratios on the micro-structures and the electrical properties of the samples were investigated in detail. The X-ray diffraction (XRD) results show that AlN (101) and AlN (202) phases precipitate out at  $2\theta$  of  $38.5^\circ$  and  $65.18^\circ$  in aluminum doping TaN films, respectively. With the increase of the Al/Ta area ratios, the deposition rate, resistivity and the absolute value of temperature coefficient of resistance (TCR) of the samples increase gradually. When the Al/Ta area ratio is zero, the resistivity and the absolute value of the TCR of the samples are  $247.8\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$  and  $12\ \text{ppm}/^\circ\text{C}$ , respectively. When the Al/Ta area ratio up to 29%, the resistivity and the absolute value of the TCR of the samples are increased to  $2560\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$  and  $270\ \text{ppm}/^\circ\text{C}$ , respectively.

**Key words** Aluminum doping; magnetron sputtering; TaN thin films; TCR

随着微波技术的不断发展,微波电子系统及其部件逐渐向微型化、集成化、薄膜化以及高温稳定性方向发展。由于微波集成电路中的电阻性功率匹配负载(功率电阻器)或衰减器需要在较高的温度下工作,因此,电阻器或衰减器的电阻层薄膜材料需要有较低的电阻温度系数(TCR)。作为薄膜电阻器的电阻层材料,TaN薄膜具有自钝化特性,能在空气中氧化生成一层约几埃厚的致密 $Ta_2O_5$ 膜,使它在非密封状态下工作时可抵抗水气的侵蚀,从而具有优良的稳定性和可靠性<sup>[1-2]</sup>。另外,当Ta<sub>2</sub>N薄膜结构主要包含六方结构(hcp)Ta<sub>2</sub>N相时,薄膜的电阻温度系数不超过 $-100\ \text{ppm}/^\circ\text{C}$ 甚至可调节至零<sup>[3-5]</sup>,所以

TaN是一种非常理想的精密电阻材料。为此,国内外对Ta<sub>2</sub>N薄膜的制备工艺及性能进行了大量的研究<sup>[6-11]</sup>。Ta<sub>2</sub>N薄膜的制备方法主要有化学气相沉积法(CVD)和反应磁控溅射法。作为薄膜电阻器的电阻层,TaN薄膜的方阻和TCR是表征电阻器性能的主要参数。调节Ta<sub>2</sub>N薄膜方阻的常用方法有两种:一是调节溅射气氛中 $N_2/Ar$ 比,因为提高溅射气氛中 $N_2/Ar$ 比可显著提高Ta<sub>2</sub>N薄膜方阻,但Ta<sub>2</sub>N薄膜的TCR也会随 $N_2/Ar$ 比的增大而增大<sup>[6]</sup>,因此该方法可调节范围有限;二是调节薄膜厚度,因为降低薄膜厚度可提高方阻,但薄膜厚度减小会显著降低薄膜电阻器的功率负荷密度。掺杂是调节薄膜方阻的有效方法,为

收稿日期:2009-07-07;修回日期:2010-03-19

基金项目:电子薄膜与集成器件国家重点实验室基金(KFJJ200804)

作者简介:蒋洪川(1971-),男,博士,副教授,主要从事电子薄膜与器件方面的研究。

此, 本文采用反应直流磁控溅射制备Ta<sub>2</sub>N薄膜, 通过Al掺杂调节TaAlN(由于样品中掺杂Al, 为避免混淆, 本文将掺杂Al的样品描述为TaAlN)薄膜的方阻, 主要考察了溅射靶材Al/Ta面积比对TaAlN薄膜微结构及电性能的影响。

### 1 实验部分

采用反应直流磁控溅射制备TaAlN薄膜, 靶材采用纯度为99.99 at.% Ta靶, 直径为Φ60 mm, 通过在Ta靶上放置金属Al片调节Al/Ta的面积比, 如图1所示。基片采用单面抛光的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷基片, 溅射气体采用纯度为99.999%的Ar和N<sub>2</sub>, 溅射时靶基距80 mm, 背底真空度5×10<sup>-4</sup> Pa, 溅射气压0.2 Pa, 溅射气氛中N<sub>2</sub>/(N<sub>2</sub>+Ar)流量比为3%, 溅射功率25 W, 溅射时间20 min, 基片温度为600 °C薄膜厚度采用台阶仪测量, 薄膜方阻采用SZ82型四探针测试仪测量, 相结构采用XRD(Bede公司DI型衍射仪, 采用Cu-K<sub>α</sub>射线)表征, 电阻温度系数采用高低温实验箱及吉时利(2400)电源测试, 测试温度范围为-36 °C~130 °C TCR为:

$$TCR = \frac{R_T - R_{25}}{R_{25}(T - 25)} \quad (1)$$

式中 R<sub>T</sub>为温度T时的薄膜电阻; R<sub>25</sub>为温度25 °C的薄膜电阻; T为测试温度。

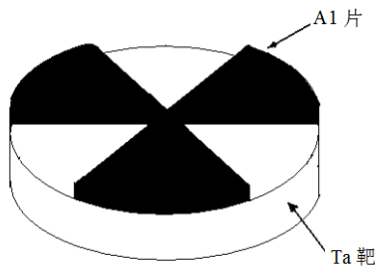


图1 靶材示意图

### 2 结果与讨论

图2所示为不同Al/Ta面积比所制备的TaAlN薄膜XRD图谱。由图可知, 所制备的TaAlN薄膜为多晶结构, 当用纯Ta靶制备薄膜时, TaN薄膜主要由六方结构(hcp)的γ-Ta<sub>2</sub>N(在2θ为36.9°出现(002)面的衍射, 在2θ为60.9°出现(110)面的衍射)、面心立方结构(fcc)Ta<sub>4</sub>N(在2θ为59.3°出现(020)面的衍射)和体心四方结构(bct)的TaN(在2θ为41.7°出现(200)面的衍射, 在2θ为64.6°出现(002)面的衍射)组成。当用TaAl复合靶制备TaAlN薄膜时, 薄膜中除了上述六方结构(hcp)的γ-Ta<sub>2</sub>N、面心立方结构(fcc)Ta<sub>4</sub>N及体心四方

结构(bct)的Ta<sub>2</sub>N外, 在2θ为38.5°和65.18°处还分别出现立方结构的AlN(101)和AlN(202)面的衍射峰。

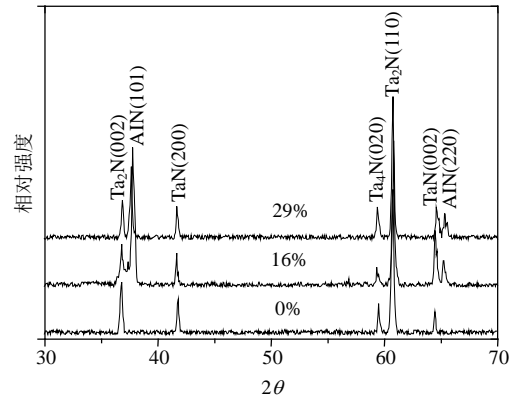


图2 不同Al/Ta面积比条件下TaAlN薄膜的XRD谱

图3所示为薄膜厚度与Al/Ta面积比的关系曲线。由图可知, 随靶材Al/Ta面积比的增大, TaAlN薄膜的厚度逐渐增加。这是由于当Al/Ta面积比增大时, 薄膜中AlN成分增加, 由于Al原子量小于Ta原子量, 被轰击出的Al原子的平均自由程大于Ta原子的平均自由程, 导致Al的沉积速率大于Ta原子的沉积速率, 而AlN的密度小于Ta<sub>2</sub>N的密度, 使得薄膜的厚度随Al/Ta面积比的增大而增大。

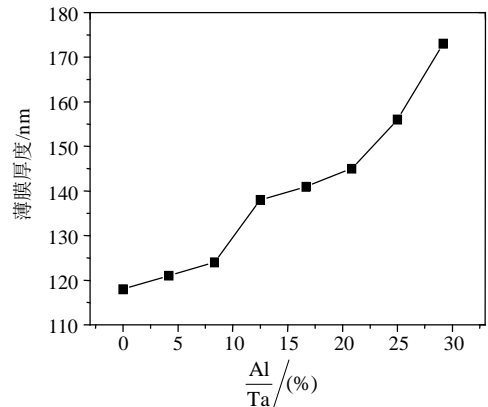


图3 不同Al/Ta面积比条件下TaAlN薄膜的厚度

图4所示为TaAlN薄膜的电阻率与Al/Ta面积比的关系曲线。由图可知, 随Al/Ta面积比的增加, 薄膜的电阻率逐渐增大。当复合靶中Al/Ta面积比为0时, TaN薄膜的电阻率较低(约为247.8 μΩ·cm), 随复合靶中Al/Ta面积比增大, TaAlN薄膜的电阻率显著增大, 当Al/Ta面积比为29%时, TaAlN薄膜的电阻率达到2 560 μΩ·cm。当Al/Ta面积比为0时, TaN薄膜中主要晶体结构为低电阻率的六方结构(hcp)的γ-Ta<sub>2</sub>N、面心立方结构Ta<sub>4</sub>N和体心四方结构(bct)的Ta<sub>2</sub>N相, 因此薄膜的电阻率较低。随着溅射靶材中Al的引入, 薄膜中析出高电阻率的AlN相, 导致薄膜电阻率显著增大。随Al/Ta面积比的增大以及溅

射粒子中Al粒子浓度的增大,薄膜中高电阻率的AlN相相对数量越来越大,导致Ta<sub>2</sub>N薄膜的电阻率随Al/Ta面积比的增大而增大。因此在不降低薄膜厚度的情况下,可通过Al掺杂有效调节TaAlN薄膜的方阻,从而可为电阻器的设计和加工提供较大的灵活性。

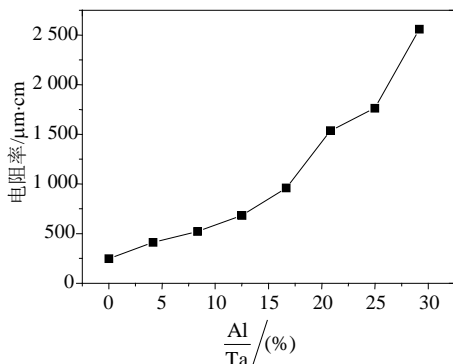


图4 不同Al/Ta面积比条件下TaAlN薄膜的电阻率

图5所示为TaAlN薄膜TCR与Al/Ta面积比的关系曲线。由图可知,随Al/Ta面积比的增大,TaAlN薄膜的TCR绝对值均逐渐增大。当Al/Ta面积比为零时,TaN薄膜的TCR绝对值为12 ppm/°C随Al/Ta面积比的增大,TaAlN薄膜的TCR绝对值急剧增大,当Al/Ta面积比增大到29%时,TaAlN薄膜的TCR绝对值增大到270 ppm/°C由于AlN相具有负的TCR且TCR的绝对值较大(达每度百万分之几千),而通常的Ta<sub>2</sub>N薄膜具有正的TCR,因此,AlN相的引入将使TaAlN薄膜的TCR向负值方向变化,随Al/Ta面积比的增大,TaAlN薄膜中AlN相相对含量增加,从而薄膜的TCR绝对值逐渐增大。因此,只要适当控制Al/Ta面积比,可使TaAlN薄膜的TCR在可接受的范围内。

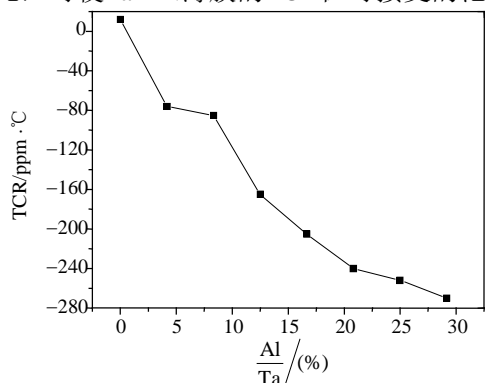


图5 不同Al/Ta面积比条件下的TaAlN薄膜的TCR

### 3 结论

掺杂Al可在TaAlN薄膜中析出立方结构的AlN相。随溅射靶材Al/Ta面积比增大,TaAlN薄膜的沉积速率、电阻率以及TCR绝对值均逐渐增大。适当

控制溅射靶材Al/Ta面积比,在不降低薄膜厚度的情况下,可有效调节TaAlN薄膜的方阻,并使TaAlN薄膜的TCR在可接受的范围内,从而为TaAlN薄膜电阻器的设计和加工提供较大的灵活性。

### 参 考 文 献

- [1] CUONG N D, KIM B D, KANG B D, et al. Structural and electrical characterization of tantalum nitride thin film resistors deposited on AlN substrates for  $\pi$ -type attenuator applications[J]. *Materials Science and Engineering B*, 2006, 135(2): 162-165.
- [2] CHUNG G S. Characteristics of tantalum nitride thin film strain gauges for harsh environments[J]. *Sensors and Actuators A*, 2007, 135(2): 355-359.
- [3] KANG S M, YOON S G, SUH S J, 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.
- [4] NA S M, PARK I S, PARK S Y, et al. Electrical and structural properties of Ta-N thin film and Ta-Ta-N multilayer for embedded resistor [J]. *Thin Solid Film*, 2008, 516(16): 5465-5469.
- [5] RIEKINENA T, MOLARIUSA J, LAURILAB T, et al. Reactive sputter deposition and properties of TaN thin films [J]. *Microelectr Eng*, 2002, 64(1-4): 289-297.
- [6] RADHAKRISHNAN K, ING N G, GOPALAKRISHNAN R. Reactive sputter deposition and characterization of tantalum nitride thin films[J]. *Materials Science and Engineering B*, 1999, 57(3): 224-227.
- [7] LU Y M, WENG R J, HWANG W S, et al. Electrical properties of Ta<sub>x</sub>N<sub>y</sub> films by implementing OES in the sputtering system[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2001, 72(2): 278-280.
- [8] WANG C M, HSIEH J H, LI C. Electrical and piezoresistive properties of TaN-Cu nanocomposite thin films[J]. *Thin Solid Films*, 2004, 30(7): 1879-1883.
- [9] TSUKIMOTO S, MORIYAMA M, MSANORI M. Microstructure of amorphous tantalum nitride thin films [J]. *Thin Solid Films*, 2004, 460(1-2): 222-226.
- [10] SHEN H, RAMANATHAN R. Fabrication of a low resistivity tantalum nitride thin films[J]. *Microelectr Eng*, 2006, 83(2): 206-212.
- [11] NAZON J, SARRADIN J, FLAUD V, et al. Effects of processing parameters on the properties of tantalum nitride thin films deposited by reactive sputtering[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 464(1-2): 526-531.

编辑 张俊