

研究与试制

## 中频磁控溅射AlN薄膜的电学性能研究<sup>\*</sup>

贾 贞, 翁卫祥, 袁军林, 张 杰, 李 昱, 郭太良

(福州大学 物理与信息工程学院, 福州 350002)

**摘 要:** 利用中频反应磁控溅射在玻璃衬底上沉积了不同溅射功率的AlN薄膜。采用X射线衍射仪、原子力显微镜和电击穿场强测试系统研究了薄膜的结构和电学性能, 并对该介质薄膜的导通机制进行了分析。结果表明, 所制备的薄膜呈非晶态, 5 kW 溅射功率下制备的薄膜具有较好的表面结构, 并具有较高的耐击穿场强, 约为 $2.1 \text{ MV/cm}$ ; 结合理论分析发现, AlN在不同的场强条件下以某一种导通作为主要的导通机制: 低场强区服从欧姆定律, 随着场强升高, 在不同的阶段分别以肖特基效应, 普尔-弗兰克尔效应和F-N效应为主。

**关键词:** AlN薄膜; 中频反应磁控溅射; 电学性能; 导通机制

**中图分类号:** O484 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-488X(2010)02-0122-05

## Electrical Properties of AlN Films Deposited by Middle Frequency Magnetron Sputtering

Jia Zhen, Weng Weixiang, Yuan Junlin, Zhang Jie, Li Yu, Guo Tailiang  
(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University,  
Fuzhou, 350002, CHN)

**Abstract:** Aluminum nitride thin films were deposited on glass substrates at different sputtering powers by medium-frequency reactive magnetron sputtering. The structure and electrical properties of AlN thin films were characterized by X-ray diffraction, atomic force microscopy and electrical breakdown field strength measurement system, and the conduction mechanisms of these dielectric films were analyzed. The result indicates that the prepared thin films are amorphous, and the thin film deposited at 5 kW sputtering power has better surface and higher breakdown field strength which is  $2.1 \text{ MV/cm}$ . It is found that AlN thin films have different conduction mechanisms under conditions of various field strengths combined with theories. The conduction mechanism follows Ohm's law in the low-field area; then as the field strength increases, the Schottky Effect, Poole-Fulankaiier Effect and F-N Effect are respectively regarded as the main mechanism at different stages.

**Key words:** AlN thin film; medium frequency magnetron reaction sputtering; electrical property; conduction mechanism

收稿日期: 2010-01-29

\* 基金项目: 国家“863”计划重大专项(2008AA03A313); 福建省重大科技专项(2004HZ01-2)

作者简介: 贾贞(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事平板显示技术光电功能薄膜的研究; (Email: jiazhenlsfy@163.com)  
翁卫祥(1982—), 男, 硕士, 实习研究员, 主要从事薄膜物理的研究;  
袁军林(1980—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事功能材料薄膜研究。

## 引言

近年来,氮化铝(AlN)的受关注度逐渐升温。由于AlN薄膜自身优异的物理和化学性质,比如热导率高、电阻率大、击穿场强高、化学稳定性好和低热膨胀系数等特点<sup>[1-2]</sup>,使其在光学、电子和机械等领域都得到广泛的研究,并在这些领域有着广阔的应用前景<sup>[3]</sup>。

很多方法可以用来制备AlN薄膜,比如金属有机物化学气相沉积法(MOCVD)<sup>[4]</sup>、分子束外延(MBE)<sup>[5]</sup>和磁控溅射<sup>[6-7]</sup>等。在这些方法中,磁控溅射是最广泛使用的一种薄膜制备方法,有着工作温度低、成本廉价和环境友好无污染的独特优势。其中直流磁控溅射和射频磁控溅射是目前制备AlN薄膜主要采用的方法。但前者存在靶中毒、阳极消失等问题,后者的射频电源结构复杂且沉积速率偏低。中频磁控溅射是以两个靶交替作为阴极,既能彻底消除阳极消失现象,同时又能提高沉积速率,是应用于大面积玻璃镀膜的一种理想制备方法。

国内外已经有为数不少的人在利用中频磁控溅射制备AlN薄膜。董浩<sup>[8]</sup>等人采用中频脉冲磁控溅射在不同基底上沉积了(002)取向的AlN薄膜,研究了薄膜的结构及光电性质。任克飞<sup>[9]</sup>等人设计了一套阳极层离子源辅助中频磁控溅射装置,并在Si(111)衬底上制得了AlN薄膜,分析了薄膜的结构、形貌和成分。但很少有人涉猎中频磁控溅射AlN薄膜电学性能的研究,此外,到目前为止文献尚未报道对AlN介质薄膜导通机制方面的探讨。本文在前人工作的基础上着重对AlN薄膜的电击穿场强及其导通机制进行研究。

## 1 实验

镀膜系统采用北京仪器厂的JPGD-1200型磁控溅射镀膜机,中频电源选择德国Httering公司生产的TIG20/100PSC型电源。两块Al靶的纯度为99.99%,靶面尺寸为600 mm × 120 mm,靶与基片间的距离为8 cm。工作气体为纯度99.999%的Ar,反应气体为纯度99.99%的N<sub>2</sub>。Ar通过质量流量计调节流量,N<sub>2</sub>经由压电陶瓷阀导入真空室。

玻璃基片清洗是在深圳和科达超声设备有限公司生产的HKD-14732玻璃超声清洗机中完成,之后放入洁净烘箱烘干。用机械泵和分子泵将镀膜室的本底真空抽至 $2.0 \times 10^{-3}$  Pa,而基片需要在130 ℃

下烘烤0.5 h。正式镀膜前先通入一定量的Ar,开启中频电源对两块Al靶预溅射15 min,目的是清除靶表面的污染物和氧化层。再充入一定量的N<sub>2</sub>,直到辉光颜色由粉色变成橘红色,表示已经进入化合物溅射模式。将基片正向对准靶面溅射,30 min后停止并自然冷却。选择不同的工艺条件下制备三块样品,工艺参数见表1。

表1 AlN薄膜的制备工艺条件

Tab 1 Process conditions of depositing AlN thin films

样品序号	Ar流量 (cm <sup>3</sup> /min)	N <sub>2</sub> 流量 (cm <sup>3</sup> /min)	溅射功率 (kW)	工作气压 (Pa)
1	160	60	1	0.6
2	160	60	3	0.6
3	160	60	5	0.6

采用Veeco公司Dektak 6M台阶仪测量AlN薄膜的厚度;采用Philips X'Pert Pro X射线衍射仪分析薄膜的晶向结构;采用本原纳米仪器公司的CSPM 3000型原子力显微镜及其图像分析软件Imager4.0对AlN薄膜的表面形貌进行表征;采用自组装的电击穿测试系统分析样品的电学性能。

## 2 结果与讨论

### 2.1 AlN薄膜的微观结构与表面形貌

图1为1 kW、3 kW和5 kW三种溅射功率下反应溅射沉积AlN薄膜的X射线衍射(XRD)谱图。从XRD图中可以看出,当N<sub>2</sub>流量恒定为60 cm<sup>3</sup>/min时,三种不同溅射功率下薄膜的XRD谱图上没有尖锐的衍射峰,说明在三种溅射功率下沉积的薄膜是非晶的。本文认为是受沉积薄膜时的基片温度的影响,由于基片的温度较低,溅射粒子沿着玻璃表面的迁移能力较弱,来不及运动到能量最低的位置,未能

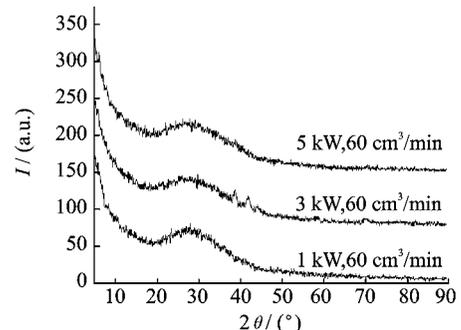


图1 不同溅射功率条件下AlN薄膜的XRD图

Fig 1 XRD patterns of AlN films deposited at different sputtering powers

形成晶态结构的薄膜。然而,文献有报道,晶态薄膜中的晶界会对其绝缘性能有影响,对于非晶态的薄膜,反而具有较好的绝缘特性<sup>[10-11]</sup>。

图2为1 kW、3 kW和5 kW三种溅射功率下反应溅射沉积AlN薄膜的AFM图,图(a)、(b)、(c)依次对应功率1 kW、3 kW和5 kW。从三种不同溅射功率下AlN薄膜的表面形貌可以看出:当溅射功率为1 kW时,表面均方根粗糙度( $R_{MS}$ )为0.833 nm,当溅射功率为3 kW时,表面均方根粗糙度为0.411 nm,当溅射功率为5 kW时,表面均方根粗糙度为0.294 nm。可见,随着溅射功率增加,AlN薄膜表面逐渐光滑,膜层的缺陷减少,薄膜变得致密,表面粗糙度下降。

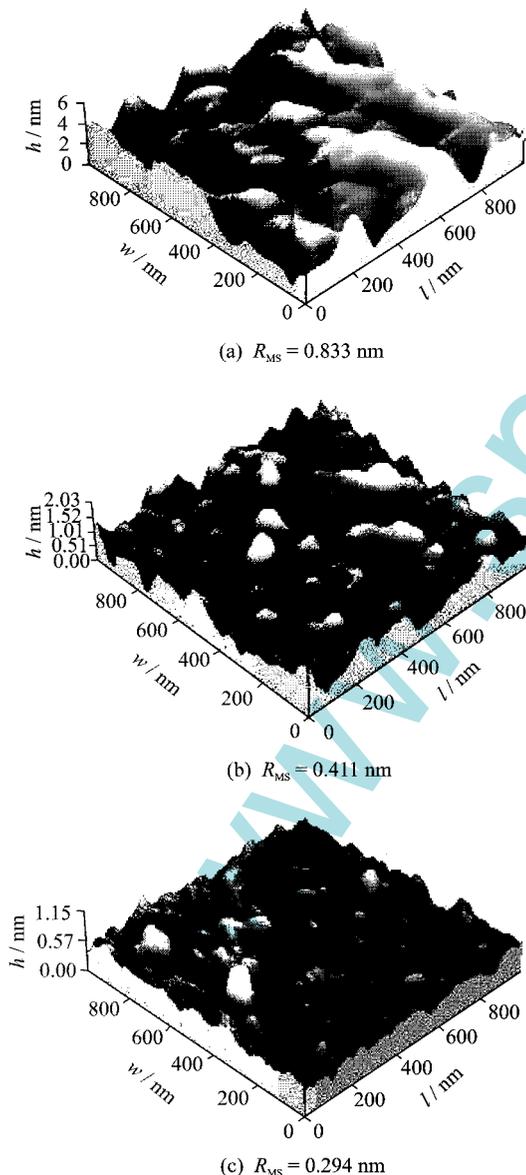


图2 不同溅射功率条件下AlN薄膜的AFM图

Fig 2 AFM morphologies of AlN films deposited at different sputtering powers

对于三种不同溅射功率沉积出的AlN薄膜,本文将分别对其作电学性能测试,通过比较电学性能的优劣选出最优的介质薄膜。

## 2.2 AlN薄膜的电学性能

在M/M(金属/绝缘体/金属)结构中,只要在上下电极间加上几十伏量级的电压就能在薄膜内部产生 $10^5 \sim 10^6$  V/cm的场强,因此M/M的电击穿场强是一个重要的电学性能参数。本文选择自组装的电击穿测试系统对其进行测量,电压和电流由Agilent 34401A获得。测试方法是将要测试的样品置于真空腔体内,以防止外界电磁干扰,具体操作是在底电极加正电压,上电极加负电压。测试样品制作成所需要的M/M结构,具体成分为Cr/Cu/Cr/AlN/Cr/Cu/Cr,相应的厚度为190 nm/500 nm/190 nm。M/M结构的制作流程图如图3所示。

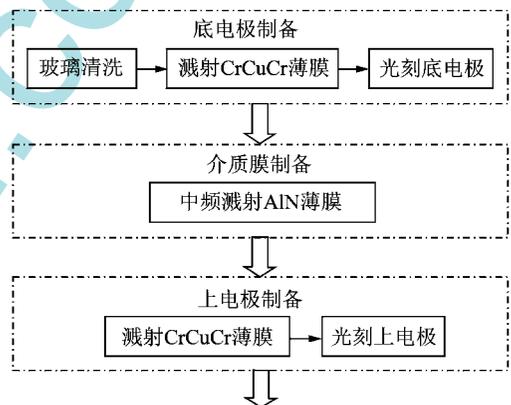


图3 M/M结构制备流程图

Fig 3 Flow chat of preparing the M/M structure

测试时先选一片作为预测样片,大致测出M/M结构的耐击穿电压,这样做目的是初步了解介质膜的电压击穿点,有利于正式实验中对击穿场强的把握,使得到的实验数据更加准确。采用步进升压法施加电压:从0 V开始缓慢加大电压,因为绝缘层的击穿是瞬间发生的,当电流突然增大时,意味着绝缘层已经击穿。图4是三种不同溅射功率沉积AlN薄膜所制得M/M结构的*I-V*特性曲线。分析曲线后发现AlN薄膜分别在约88 V、94 V和105 V时被击穿,经计算得到击穿场强依次为1.76 MV/cm、1.88 MV/cm、2.1 MV/cm。显然在溅射功率为5 kW时所制得AlN薄膜的电击穿性能更加优越。

介质膜作为很好的绝缘体,并非真正意义上的绝缘,在外加电场作用下仍会有一些电流通过,并且介质膜在不同的电场强度下存在着不同的导通机制,而不同的导通机制又可以用来判定介质膜的优

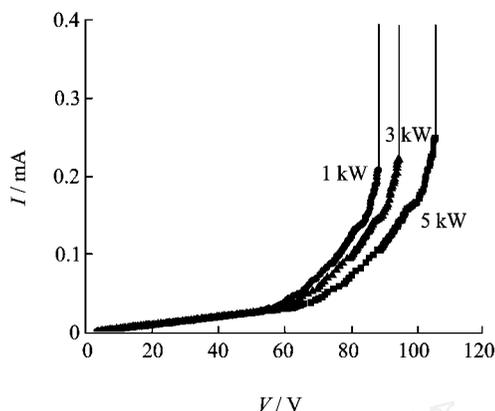


图4 不同溅射功率下A N 薄膜的I-V 特性曲线

Fig 4 I-V curves of A N films deposited at different sputtering powers

劣。下面就通过对溅射功率为5 kW 时所制得M M 结构的J-E 特性的分析,来获得A N 薄膜的导通机制。图5(a)是A N 为介质膜的M M 电容结构的I-V 曲线经过转换后得到的J-E 曲线。从图5(a)中截取  $E < 0.4 \text{ MV/cm}$  范围内的曲线,如图5(b)所示,从图中看出在  $E < 0.4 \text{ MV/cm}$  的范围内,电流密度随着场强增大呈现出线性增加,体现出近似于准欧姆特性。

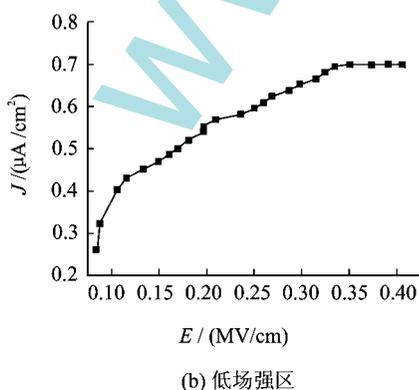
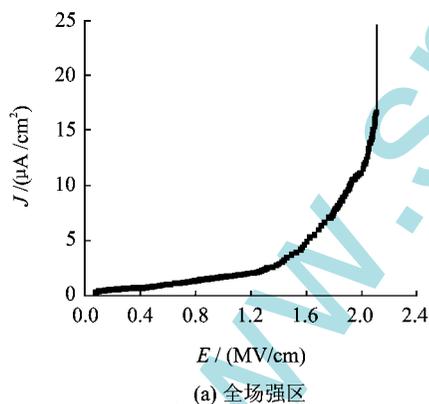


图5 A N 薄膜的J-E 特性曲线

Fig 5 J-E curves of A N films

测得的数据所制得的M M 结构电流密度的对数  $\ln(J)$  随场强的平方根  $E^{1/2}$  的关系曲线如图6 所示。在电场强度为  $0.4 \sim 1.2 \text{ MV/cm}$  范围内,曲线呈现出很好的线性关系,参考肖特基效应的理论公式我们发现,肖特基效应的电流密度对数  $\ln J$  与  $\sqrt{E}$  成线性关系。可以判定此时的导电方式是肖特基导通机制,这时候所加的电场使电子逸出金属的势垒降低,金属电极表面的电子向介质中发射变得容易,而从曲线的范围来看它也是薄膜主要的导通方式。

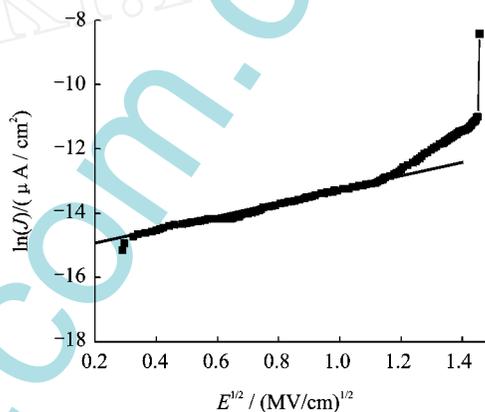


图6 A N 薄膜的  $\ln J-E^{1/2}$  曲线

Fig 6  $\ln J-E^{1/2}$  cruve of the A N film

图7 是场强大于  $1.2 \text{ MV/cm}$  时的  $\ln(J/E)-E^{1/2}$  关系曲线。可看到在  $2.1 \text{ MV/cm} > E > 1.2 \text{ MV/cm}$  的场强范围内,曲线显示出很好的线性,符合普尔-费兰凯尔公式,此种情况下  $\ln(J/E)$  同  $E^{1/2}$  呈现线性关系,从图中可以看出,对于制备的A N 薄膜,此时的导通机制主要是普尔-费兰凯尔效应在起作用,此时电流主要来自于介质内部的价带与导带电子的受激发。

图8 为A N 薄膜的  $\ln(J/E^2)-\frac{1}{E}$  曲线。从图8 中

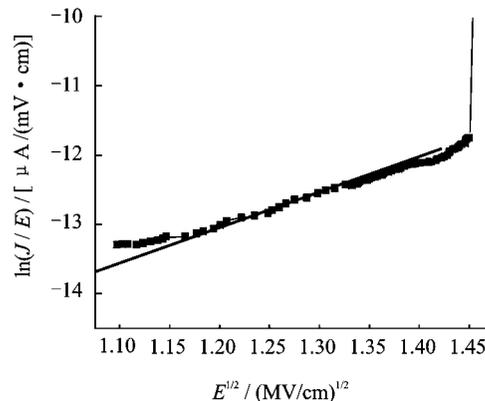


图7 A N 薄膜的  $\ln(J/E)-E^{1/2}$  关系曲线

Fig 7  $\ln(J/E)-E^{1/2}$  cruve of the A N film

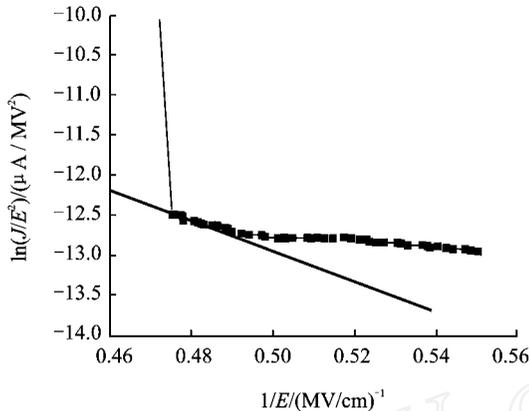


图8 AlN 薄膜  $\ln(J/E^2) - \frac{1}{E}$  曲线

Fig 8  $\ln(J/E^2) - \frac{1}{E}$  of the AlN film

可以看出,当场强大于  $2.1 \text{ MV/cm}$  时,  $\ln(J/E^2)$  和  $\frac{1}{E}$  呈现出较好的线性关系,根据富勒-诺德汉姆公式<sup>[12-14]</sup>,当薄膜的导通机制为F-N 效应时,  $\ln(J/E^2)$  和  $\frac{1}{E}$  呈线性关系。这表明此时发生了F-N 隧道导通,这是由于高场强下电子可能会由于隧道效应穿过势垒,产生隧道导通现象。由于发生F-N 导通时,电流密度  $J$  随场强  $E$  的变化是指数关系,  $J$  随  $E$  的变化极其敏感,即  $E$  增大一点就会有有很大的电流产生,这在实验中已得到验证;在预测过程中当介质膜的外加电压在这个范围内稍微变化,电流就会突增到毫安量级,介质膜被击穿从而失去绝缘性,并且这种击穿是不可逆的。

### 3 结 论

利用中频磁控反应溅射在玻璃基底上制备了 AlN 薄膜,发现溅射功率对薄膜的晶向结构和表面形貌均有着显著的影响。分别对三种不同溅射功率条件下制备的 AlN 薄膜进行电学性能测试,发现溅射功率  $5 \text{ kW}$  时沉积 AlN 薄膜的电击穿场强最高,约为  $2.1 \text{ MV/cm}$ ,且击穿场强在小于  $0.4 \text{ MV/cm}$ 、 $0.4 \sim 1.2 \text{ MV/cm}$ 、 $1.2 \sim 2.1 \text{ MV/cm}$  和大于  $2.1 \text{ MV/cm}$  范围内的导通机制分别为准欧姆特性、肖

特基效应、普尔-费兰凯尔效应和F-N 效应。

### 参 考 文 献

- [1] Bengtsson S, Bergh M, Choumas M, et al Applications of Aluminum Nitride films deposited by reactive sputtering to silicon-on-insulator materials[J]. Jpn J Appl Phys, 1996, 35: 4175-4181.
- [2] Kuang J C, Zhang C R, Zhou X G, et al Synthesis of high thermal conductivity nano-scale aluminum nitride by a new carbothermal reduction method from combustion precursor [J]. J Cryst Growth, 2003, 256: 288-291.
- [3] Strite, Morkoc H. GaN, AlN, and InN: a review [J]. J Vac Sci Technol B, 1992, 10: 1237-1266.
- [4] Mastro M A, Eddy Jr C R, Gaskill D K, et al MOCVD growth of thick AlN and AlGaIn superlattice structures on Si substrates[J]. J Cryst Growth, 2006, 287(2): 610-614.
- [5] Vispute R D, Wu H, Narayan J. Epitaxial growth of AlN thin films on silicon (111) substrate by pulsed laser deposition[J]. Appl Phys Lett, 1995, 67(27): 4724-4728.
- [6] Wu Long, Wu Sean, Song Hongtie Influence of sputtering pressure on physical structure of AlN films prepared on  $Y-128 \text{ Ln bO}_3$  by rf magnetron sputtering[J]. J Vac Sci Technol A, 2001, 19(1): 167-170.
- [7] Oliveira IC, Grigorov K G, Maciel H S, et al High textured AlN thin films grown by RF magnetron sputtering: composition, structure, morphology and hardness[J]. Vacuum, 2004, 75(4): 331-338.
- [8] 董 浩,黎明锴,刘传胜,等 中频脉冲磁控溅射制备氮化铝薄膜[J]. 武汉大学学报, 2002, 48(3): 339-342.
- [9] 任克飞, 阴明利, 邹长伟, 等 中频磁控溅射制备 AlN 薄膜[J]. 核技术, 2009, 32(3): 169-172.
- [10] Kwon DaeHyuk, Cho ByungWoog, Kim ChangSoo, et al Effects of heat treatment on  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  sensing membrane for low drift and high sensitivity pH-ISFET [J]. Sensors and Actuators B, 1996, 34: 441-445.
- [11] 马志伟, 米仪琳, 张 铭, 等 氧气气氛退火对磁控溅射  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜结构、表面形貌及电学性能的影响[J]. 北方工业大学学报, 2007, 19(3): 58-61.
- [12] 金维芳. 电介质物理学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995: 41-120.
- [13] 孙日珍. 电介质物理基础[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2000: 143-190.
- [14] 科埃略 R. 阿拉德尼兹 B. 电介质材料及其介电性能[M]. 张冶文, 陈 玲, 译 北京: 科学技术出版社, 2000: 162-179.