

文章编号 1004-924X(2013)12-3058-08

# 硅基氮化铝薄膜风致振动 MEMS 能量采集单元

尚正国\*, 李东玲, 温志渝, 赵兴强  
(重庆大学 光电工程学院, 重庆 400044)

**摘要:**研究了基于氮化铝(AIN)薄膜的压电式风致振动微机电系统(MEMS)能量采集单元的制备工艺。采用脉冲直流磁控溅射的方法制备了具有(002)择优取向的 AIN 压电薄膜,并通过 X 射线衍射仪(XRD)及扫描电镜(SEM)表征了 AIN 薄膜的性能。测试结果表明:种子层材料、气体流量比和衬底温度等对 AIN 薄膜晶体取向及薄膜性能有重要影响。制备的具有(002)择优取向的 AIN 薄膜的衍射强度达到  $10^5$  count, 半高宽为  $2.7^\circ$ 。对硅基 AIN 风致振动 MEMS 能量采集单元加工工艺流程进行优化,制备出了风致振动能量采集系统原理样机。风洞实验表明,在 15.9 m/s 的风载荷作用下, MEMS 能量采集单元的最大输出功率为  $1.6 \mu\text{W}$ 。该工艺亦可用于其他硅基 AIN 薄膜 MEMS 器件的制备。

**关键词:**风致振动; MEMS 能量采集; 硅基氮化铝薄膜; 衍射强度; 摇摆曲线

**中图分类号:**TK83;O484.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132112.3058

## Flow-induced-vibration MEMS energy harvesting unit based on AlN film in silicon

SHANG Zheng-guo, LI Dong-ling, WEN Zhi-yu, ZHAO Xing-qiang

(College of Opto Electronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhengry@cqu.edu.cn

**Abstract:** A flow-induced-vibration Micro-electronic-mechanic System(MEMS) energy harvesting unit based on an Aluminum nitride( AlN) film on the silicon was presented. The AlN film with crystal orientation(002) was prepared by DC- pulse magnetron sputtering and its performance was characterized by the X-ray Diffraction(XRD) and the Scanning Electron Microscopy(SEM). The results show that the crystal orientation and performance of the AlN film are depended on the seed layer materials, gas flow ratio and the substrate temperature, its crystal orientation is (002), and its intensity and Full Width at Half Maximum(FWHM) are 105 counts and  $2.7^\circ$ , respectively. The prototype of the flow-induced-vibration MEMS energy harvesting unit was presented after optimizing process flow. The wind tunnel experiments show that the maximum power output of the flow-induced-vibration MEMS energy harvesting unit is about  $1.6 \mu\text{W}$  when the wind speed is 15.9 m/s. The optimization process also can be used to fabricate other MEMS devices based on the AlN film.

**Key words:** flow-induced-vibration; MEMS energy harvesting; AlN film in silicon; diffraction intensity; rocking curve

收稿日期:2013-07-20;修订日期:2013-09-03.

基金项目:十二五中期微电子预研资助项目(No. 5130805214)

## 1 引言

微型化、低成本、长寿命等是无线传感网络 (Wireless Sensor Networks, WSNs) 的重要发展方向<sup>[1,2]</sup>,无线传感节点的能量供给是影响其体积和寿命的关键因素之一。电池等传统的供能技术寿命有限,需定期更换,不仅费时耗力,其运营成本也大幅增加<sup>[3]</sup>,利用自然界广泛存在的风能、热能、光能、振动能及流体动能等环境能量为无线传感网络节点供电已成为目前研究的热点<sup>[4-9]</sup>。风能是自然界广泛存在的一种能量,微型风能采集器的研究已经引起国内外的广泛关注<sup>[10,11]</sup>。压电式风能采集器具有结构简单、功率密度高和易于 CMOS 工艺兼容等优点,是微型风能采集器研究的热点。

Clair 等将压电片固定于谐振腔上,组装了风致振动能量收集器,其压电片尺寸为: 13 mm×12 mm×0.127 mm,优化负载为 49.65 kΩ,在风速为 12.9 m/s,压力为 100 Pa 时,最大功率为 0.9 mW<sup>[12]</sup>。Argentina 等和 Kawai 等对利用旗帜结构收集风能产生振动发电进行了研究<sup>[13,14]</sup>。Priya 等利用风车结构制备了双层压电膜片的发电机,其双晶压电片尺寸为 60 mm×20 mm×0.6 mm,外加一个自由端悬臂梁尺寸为 55 mm,在风速为 10 m/h 时,输出功率为 7.5 mW<sup>[15]</sup>。以上风致振动能量收集器都是将多个小尺寸部件组装而成,无法满足 WSNs 节点等对小体积、低成本电源的需求。Liu 等采用 MEMS 技术,制备了 MEMS 风致能量采集器,在风速为 15.6 m/s 时,等效阻抗为 100 kΩ,但其输出最大功率只有 3.3 nW<sup>[16]</sup>,远不满足无线传感网络节点的需求<sup>[17]</sup>。

高性能压电薄膜是实现高性能风致振动压电能量采集器的关键,目前压电能量采集器常用的压电材料包括锆钛酸铅 (PZT)、氮化铝 (AlN)、氧化锌 (ZnO) 及聚偏氟乙烯 (PVDF) 等。PZT 膜制备工艺复杂,且对环境有害;ZnO 性能不稳定,易于受到环境的影响;PVDF 为柔性材料,与硅基 MEMS 加工工艺兼容性不好;AlN 功能材料具有耐高温、性能稳定和与 CMOS 工艺兼容等特点<sup>[18-20]</sup>。为此,本文重点研究 AlN 压电薄膜的制备技术,同时对硅基 AlN 压电薄膜的 MEMS 风致振动能量采集单元的制备工艺进行了优化,对

研制出的 MEMS 风致振动能量采集单元的性能进行了测试,该工艺可广泛用于硅基 AlN 薄膜 MEMS 器件的制备。

## 2 工作原理及制备工艺

### 2.1 工作原理

风致振动能量采集系统的基本结构如图 1 所示,主要由钝体、防撞块、弹性梁、固定端及 MEMS 能量采集单元组成。风从入口进入,经过钝体后产生扰动,当风速大于弹性梁的临界风速时,弹性梁产生大幅振动,弹性梁与防撞块碰撞,带动弹性梁自由端的 MEMS 能量采集单元振动,导致 MEMS 能量采集单元的压电薄膜产生形变,进一步引起位于压电膜上、下表面的两个金属电极之间产生交变电势差,利用该电势差就可以为负载供电。贺学锋<sup>[4]</sup>等对基于压电材料的振动能采集器进行了建模及实验验证,D. St. Clair<sup>[12]</sup>等人对基于自激振动的风能采集器的动态方程进行了推导。由于风致振动 MEMS 能量采集器的过程复杂,其理论尚不完善,相关报道较少。

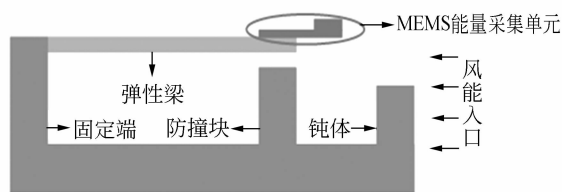


图 1 风致振动能量采集系统示意图

Fig. 1 Block diagram of energy harvester based on flow induced vibration

### 2.3 关键加工工艺

输出功率及内部等效阻抗是衡量风致振动 MEMS 能量采集器的重要性能指标参数,该指标参数除与器件本身设计结构有关外,主要取决于所使用的压电材料的性能及制备该器件时所选定的工艺流程。本文首先研究高性能 AlN 薄膜的制备工艺,并在此基础上对 MEMS 压电能量采集单元的工艺流程进行优化。

#### 2.3.1 AlN 压电薄膜的制备

采用脉冲直流磁控溅射制备具有 (002) 择优取向的 AlN 压电薄膜。工艺气体 Ar 和 N<sub>2</sub> 纯度分别为 99.999 9% 和 99.999%, Al 靶材纯度为 99.999%。基片首先经过标准程序清洗烘干后,

热氧化生长 300 nm 厚的  $\text{SiO}_2$  层作为底层电极层的绝缘层。重点分析种子层、衬底温度、气体流量比、衬底材料等对 AlN 薄膜性能的影响,在此基础上对 AlN 薄膜制备工艺参数进行优化。

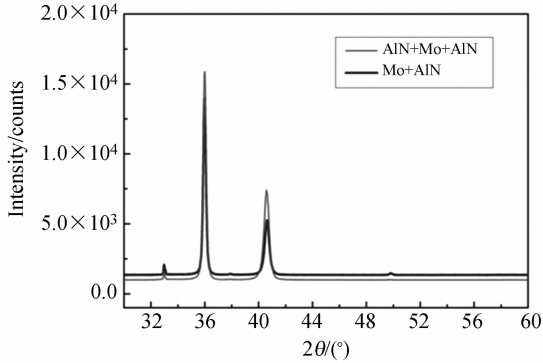


图 2 种子层对 AlN 膜性能的影响

Fig. 2 Influence of seed layer on properties of AlN films

种子层的特性会影响 AlN 压电薄膜层的性能,种子层的晶体取向是决定 AlN 压电薄膜层晶体取向的关键因素之一。图 2 为单层 AlN 种子层对 AlN 膜性能影响的 XRD 图谱,从图 2 中可以看出,以 Mo 层为底电极层,在相同测试条件下,增加薄层 AlN 种子层后,其生长的功能层 AlN 薄膜的衍射强度明显增加,同时该种子层还可以增加 Mo 层与基底  $\text{SiO}_2$  层的粘附性,有助于 Mo 的晶体取向为(110)取向,可减小功能层 AlN 薄膜的半高宽。该结论与文献[20]所述结论一致。

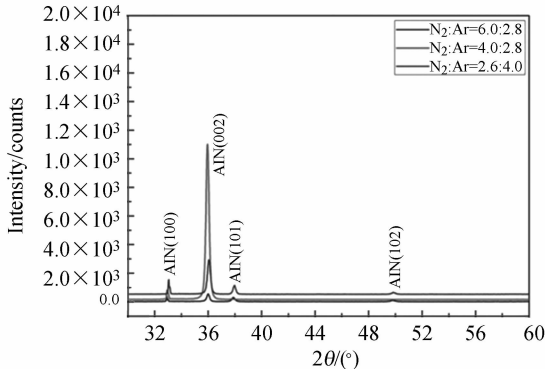


图 3 气体流量比对 AlN 薄膜性能影响

Fig. 3 Influence of gas flow ratio on properties of AlN films

为提高 AlN 薄膜的结晶度,同时改变 AlN 薄膜的择优取向,通过改变工艺气体  $\text{N}_2$  和 Ar 的

气体流量比进行试验,XRD 测试结果如图 3 所示。从图 3 中可知,在  $\text{N}_2/\text{Ar}$  为 4.0 : 2.8 时,AlN(002)晶体取向衍射峰强度明显较大,说明在该比例条件下,AlN 薄膜的结晶性能优于其它两种比率条件下的结晶性能。究其原因, $\text{N}_2/\text{Ar}$  比率增加,衬底原子的重排性能降低,AlN 薄膜结晶性能减弱;另一方面,比率增加,Al 原子和 N 原子反应更充分,有利于薄膜的结晶性能的改变<sup>[21]</sup>。

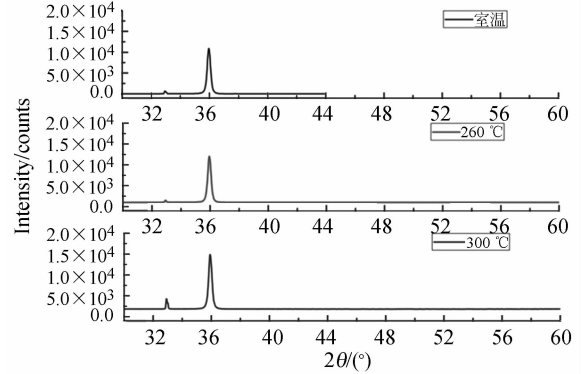


图 4 温度对 AlN 膜性能的影响

Fig. 4 Influence of temperature on properties of AlN films

图 4 为温度对 AlN 压电薄膜性能的影响。增加衬底温度可以增加沉积在衬底表面的 Al 原子和 N 原子的动能,提高 Al 原子和 N 原子跨越表面势垒的几率,增加 Al 原子和 N 原子的扩散长度,即增加了气体分子的平均自由程,使其在衬底上容易发生迁徙,有利于 AlN 薄膜的晶化。图 5 所示为衬底材料对 AlN 膜性能的影响,由图 5 可知,以 Ti/Pt 和 Mo 为衬底生长的 AlN 薄膜,都具有(002)的择优取向,而以 Cr/Au/Mo 和 Al/Mo 为衬底的 AlN 压电薄膜的晶体取向分别为(101)和(110)。由此可知,衬底是影响 AlN 薄膜生长晶体取向的重要因素。衬底的晶体晶格系数越接近于 AlN 的晶格系数,生长出来的 AlN 薄膜的半高宽就越小,其结晶化程度就越好。

晶格系数及气体分子自由程是影响 AlN 压电薄膜的关键因素,衬底优化是为了达到最小的晶格失配度;改变衬底温度及工艺真空度等参数,是为了增大气体分子的平均自由程。为此,制备高性能的 AlN 压电薄膜,以上工艺参数不能从单一变化趋势调整优化,只有充分考虑到影响 AlN 薄膜结晶的综合因素,各个参数间达到一个动态

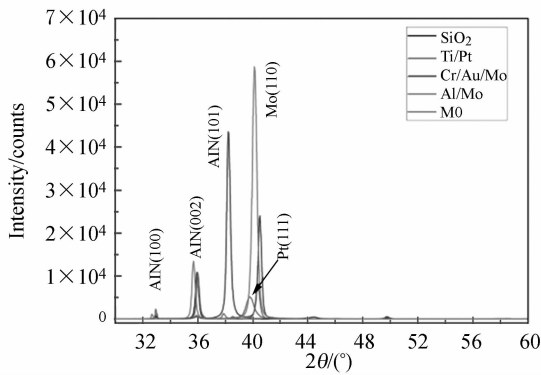


图 5 衬底材料对 AlN 膜性能的影响

Fig. 5 Influence of bottom materials on properties of AlN films

的平衡,才能完成高性能的 AlN 压电薄膜的生长,其优化后的工艺参数如表 1 所示。

表 1 AlN 薄膜制备优化工艺参数

Tab. 1 Optimized conditions of AlN film

参数	数值
基底真空度/mbarr	$5.0 \times 10^{-7}$
工艺真空度/mbarr	$2.1 \times 10^{-3}$
靶基距/mm	80
气体(N <sub>2</sub> :Ar)流量/cm <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup>	20:4
功率/W	800
衬底温度/°C	270

考虑到硅基 AlN 风致振动 MEMS 能量采集单元加工工艺流程的兼容性及其可靠性,采集单元采用如图 6 所示的结构。双层种子层 AlN 和 Mo 层的厚度分别为 20 nm 和 250 nm,以优化后的工艺参数进行 AlN 压电薄膜的制备。通过 XRD 测试 AlN 薄膜的摇摆曲线如图 7 所示。由图 5 可知,以 Mo 为衬底较以 Ti/Pt 为衬底的 AlN 压电薄膜的 XRD 测试具有更高的衍射强度,主要原因相比于 Ti/Pt,Mo 的晶格系数更接近于 AlN 的晶格系数。但若以 Ti/Pt/Mo 为衬底要远优于仅以 Mo 为衬底所得 AlN 薄膜的衍射强度,如图 7 所示;另外仅以 Mo 为底层电极层制备硅基 AlN 风致振动 MEMS 能量采集单元,在后续 AlN 功能层的湿法图形化工艺中,Mo 电极表层的部分 AlN 很难被腐蚀完全<sup>[22]</sup>,从而导致风致能量采集器内阻较大,输出功率极小。为避免此现象的出现,同时为进一步提高 AlN 压电薄膜的

结晶化度和减小 AlN 压电薄膜的半高宽,在电极层 Ti/Pt 和功能层 AlN 之间插入 AlN 层和 Mo 层——双层种子层进行 AlN 压电薄膜的生长。采用优化后的工艺参数,按照图 6 的 MEMS 能量采集单元截面示意图的结构进行 AlN 薄膜的制备,其测试结果如图 7 所示。

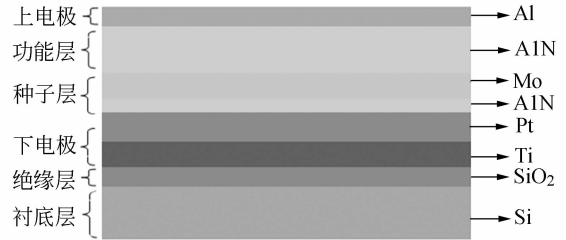


图 6 悬臂梁横截面示意图

Fig. 6 Cross section diagram of cantilever beam

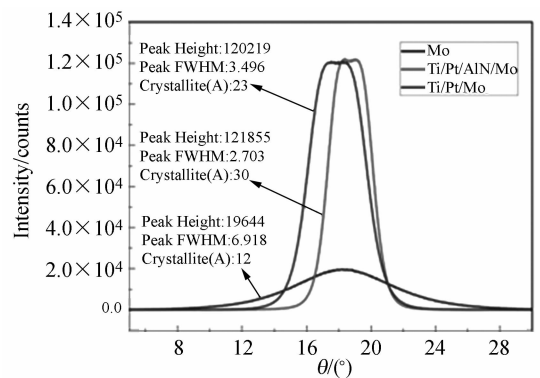


图 7 AlN 薄膜的摇摆曲线

Fig. 7 Croaking curve of AlN film

从图 7 中可以看出,分别以 Mo、Ti/Pt/Mo 及 Ti/Pt/AlN/Mo 为电极层时,相同条件下生长出来的 AlN 压电薄膜,三者的晶体择优取向均为(002),但其晶粒尺寸由 1.2 nm 增加到 3.0 nm;以 Ti/Pt 为电极层的 AlN 压电薄膜的衍射强度要远高于 Mo 作为电极层时 AlN 压电薄膜的衍射强度;尽管以 Ti/Pt/Mo 和 Ti/Pt/AlN/Mo 作为电极层的衍射强度差别不大,但前者的半高宽为 3.496°,而后者的半高宽只有 2.703°。由此可见,衬底材料是影响 AlN 薄膜生长晶体取向的重要因素。衬底材料的晶格系数越接近于 AlN 的晶格系数,生长的 AlN 压电薄膜的半高宽就越小,其结晶化程度就越好<sup>[23,24]</sup>。

### 2.3.2 加工工艺流程优化

以 N 型(100)晶向双面抛光 SOI 基片为衬

底,其电阻率为  $2\sim 4 \Omega \cdot \text{cm}$ ,顶层和底层硅层厚度分别为  $50 \mu\text{m}$  和  $450 \mu\text{m}$ ,中间夹层  $\text{SiO}_2$  层厚度为  $1 \mu\text{m}$ 。优化后的工艺流程如图 8 所示。首先通过热氧化在 SOI 基片双面生长  $300 \text{ nm}$  的  $\text{SiO}_2$  层作为绝缘层,随后进行下电极 Ti/Pt 的生长,并采用剥离工艺将其图形化。为了避免双层种子层( $\text{AlN}$ : $20\sim 25 \text{ nm}$ , $\text{Mo}$ : $250 \text{ nm}$ )图形化后对功能层  $\text{AlN}$  的生长产生颗粒污染,双层种子层和功能层  $\text{AlN}$  采用一次性完成,而后分别对功能层、种子层进行图形化;以同样的方式生长并图形化上电极 Al;通过 BHF 漂去  $\text{SiO}_2$  基片表层  $\text{SiO}_2$  层并在背面磁控溅射生长  $100 \text{ nm}$  的  $\text{AlN}$  层作为背面结构释放时的掩蔽层;采用感应耦合等离子深槽刻蚀(DRIE)技术分别对基片的正面和背面进行刻蚀,以形成梁厚及结构释放。最后通过反应离子刻蚀(RIE)技术去除 SOI 基片中间夹层的  $\text{SiO}_2$  层,形成硅基  $\text{AlN}$  薄膜 MEMS 风致振动能量采集单元。

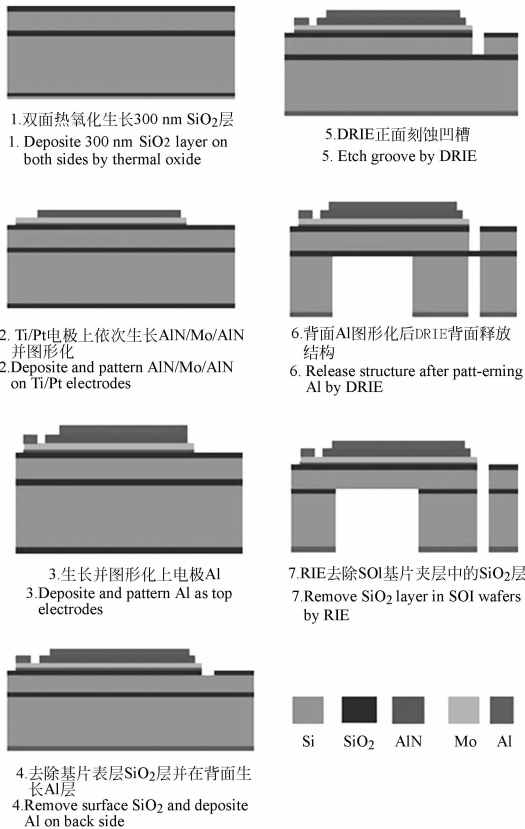
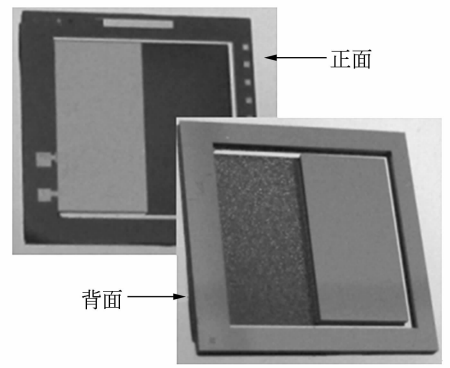


图 8 能量收集单元加工工艺流程

Fig. 8 Process flows of the energy harvester unit

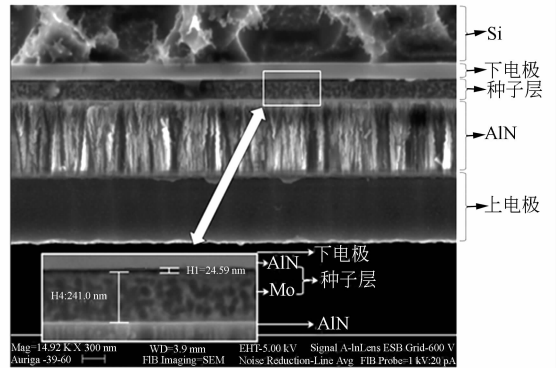
高性能  $\text{AlN}$  压电薄膜的制备及硅基  $\text{AlN}$  风致振动 MEMS 能量采集器结构设计是决定能量采集器性能指标的决定性因素,而工艺流程的优化则是其成品率的关键所在。在对衬底材料的选择过程中, $\text{Mo}$  的晶格系数与  $\text{AlN}$  薄膜的晶格系数最为接近,是制备高性能  $\text{AlN}$  薄膜可选的一种衬底材料,但由于其化学性质活泼,与  $\text{Al}$ 、 $\text{AlN}$  腐蚀的工艺兼容性对成品率有重要影响;另外  $\text{Mo}$  材料硬度极大,若仅仅以  $\text{Mo}$  为下电极,后续的引线键合就很难进行,同时考虑到  $\text{AlN}$  图形化后会在  $\text{Mo}$  上面有残留物存在<sup>[23]</sup>,为此,制定了如图 8 所示的工艺流程图。

根据优化后的工艺流程图,制备出了如图 9 (a)所示的硅基  $\text{AlN}$  薄膜 MEMS 风致振动能量采集单元,由该采集单元压电悬臂梁截面的 SEM 图 9(b)可见,不同薄膜清晰可辨, $\text{AlN}$  生长方向垂直于晶面(100)方向。



(a) 能量采集单元照片

(a) Photograph of energy harvester unit



(b) 悬臂梁截面 SEM 图

(b) SEM of cantilever beam cross section

图 9 硅基  $\text{AlN}$  风致振动 MEMS 能量采集单元

Fig. 9 Flow induced vibration MEMS energy harvester unit based on  $\text{AlN}$  film

### 3 性能测试

为测试硅基 AlN 风致振动 MEMS 能量采集单元的性能,搭建如图 10 所示的测试系统,主要由风速通道、风速仪、示波器、风致振动能量采集系统等构成。MEMS 能量采集系统固定于风洞的工作段内,通过风速控制器和风速仪实施控制并显示风速,示波器显示硅基 AlN 风致振动 MEMS 能量采集系统的输出电压。

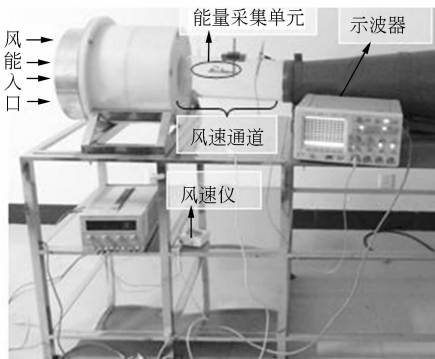


图 10 能量采集单元测试系统

Fig. 10 Test system of energy harvester unit

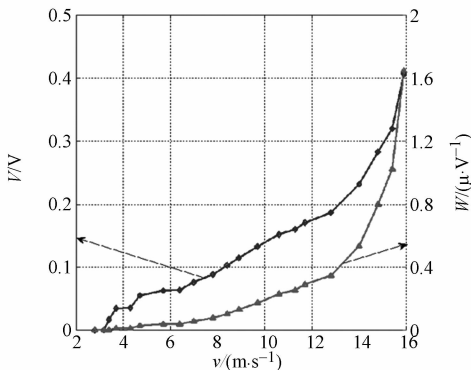


图 11 输出电压、功率与风速之间的关系(负载为 100 k $\Omega$ )

Fig. 11 Voltage and power vs wind speed (load is 100 k $\Omega$ )

首先在振动台上对 MEMS 压电能量采集单元的动态特性进行了测试。测试结果表明,采集单元的一阶固有频率约为 635 Hz,相应的匹配阻抗约为 100 k $\Omega$ 。然后将 MEMS 压电能量采集单元的风致振动能量采集器置于风洞内对其风能采集特性进行了测试。测试时风速逐步由小变大,通过示波器测出在不同风速下 MEMS 压电能量采集单元施加于 100 k $\Omega$  电阻两端的电压,相应的输出功率可以直接根据该电压的有效值得到。当风速超过风致振动能量采集系统的临界风速后,采集系统开始起振,随着风速变大,振幅增加,当风速为 6.4 m/s 时, MEMS 能量单元开始起振,但输出功率只有 41 nW;当风速继续增加 15.9 m/s 时,输出功率达到约 1.6  $\mu$ W。

以上实验表明,当风速为 15.9 m/s 时,采用以上工艺制作的 MEMS 能量采集单元的最大输出功率达到 1.6  $\mu$ W,功率密度约 1.0 mW/cm<sup>3</sup>。

### 4 结 论

采用直流脉冲磁控溅射的方式制备了具有(002)择优取向的 AlN 压电薄膜,分析了衬底材料、工艺参数等对 AlN 压电薄膜晶体取向及性能的影响。通过插入 25 nm AlN 和 200 nm Mo 作为种子层,以 Ti/Pt 为下电极,制备出具有(002)择优取向的 AlN 压电薄膜,其衍射强度达到 105 counts,半高宽为 2.7 $^\circ$ 。将该 AlN 压电薄膜应用于风致能量采集器的制备,在风速为 15.9 m/s 时,其输出功率为 1.6  $\mu$ W,功率密度达到 1.0 mW/cm<sup>3</sup>,为特殊环境下低功耗无线传感网络节点的能量供给提供了良好的解决方案。经过优化后的流程,不仅可用于制作硅基 AlN MEMS 风致振动能量采集单元,也可以用于制作其它硅基 AlN 薄膜 MEMS 压电器件。

### 参考文献:

[1] ELFRINK R, KAMEL T M, GOEDBIOED M, *et al.*. Vibration energy harvesting with aluminum nitride-based piezoelectric devices [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009, 19 (9):4005.

[2] VAN S R, ELFRINK R, KAMEL T M, *et al.*. Piezoelectric AlN energy harvesters for wireless autonomous transducer solutions [C]. *IEEE, Sensors*, 2008:45-48.

[3] LEE B C, RAHMAN M A, HYUN S H, *et al.*. Low frequency driven electromagnetic energy har-

- vester for self-powered system [J]. *Smart Materials and Structures*, 2012,21(12):5024.
- [4] 贺学锋,杜志刚,赵兴强,等. 悬臂梁式压电振动能量采集器的建模及实验验证[J]. *光学精密工程*, 2011,19(8): 1771-1778.  
HE X F, DU ZH G, ZHAO X Q, *et al.*. Modeling and experimental verification for cantilevered piezoelectric vibration energy harvester [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(8): 1771-1778. (in Chinese)
- [5] 王淑云, 阚君武, 王鸿云, 等. 基于圆弧限位的压电发电装置[J]. *光学精密工程*, 2013,21(2):342-348.  
WANG SH Y, KAN J W, WANG H Y, *et al.*. Piezoelectric energy generator based on deflection-limiting circular arc [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,21(2):342-348. (in Chinese)
- [6] 阚君武, 王淑云, 彭少锋, 等. 多振子压电发电机的输出特性[J]. *光学精密工程*, 2011,19(9):2108-2115.  
KAN J W, WANG SH Y, PENG SH F, *et al.*. Output performance fo piezoelectric generator with multi-vibrators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(9):2108-2115. (in Chinese)
- [7] 袁江波, 单小彪, 谢涛, 等. 悬臂梁单晶压电发电机的实验[J]. *光学精密工程*, 2009,17(5):1072-1077.  
YUAN J B, SHAN X B, XIE T, *et al.*. Experiment of monocrystal piezoelectric generator with cantilever beam structure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(5):1072-1077. (in Chinese)
- [8] 刘祥建, 陈仁文. Rainbow 型压电换能结构的有限元分析与实验[J]. *光学精密工程*, 2011,19(4):789-796.  
LIU X J, CHEN R W. Finite element analysis and experiments on Rainbow shape piezoelectric energy transferring elements [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(4):789-796. (in Chinese)
- [9] WANG D A, PHAM H T, CHAO C W, *et al.*. A piezoelectric energy harvester based on pressure fluctuations in Kármán Vortex Street [C]. *Proceedings World Renewable Energy Congress 2011, Linköping, Sweden: Hydropower Applications*, 2011: 1456-1463.
- [10] GALCHEV T, KIM H, NAHAFI K. Micro power generator for harvesting low-frequency and non-periodic vibrations [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2011,20(4):852-866.
- [11] HE X F, GAO J. Wind energy harvesting based on flow-induced-vibration and impact [J]. *Microelectronic Engineering*, 2013:82-86.
- [12] ST C D, BIBO A, SENNAKESAVABABU V, *et al.*. A scalable concept for micropower generation using flow-induced self-excited oscillations [J]. *Applied Physics Letters*, 2010,96(14):144103-1-3.
- [13] KAWAI H. Energy converter, flag type energy converter [R]. Google Patents, 2009.
- [14] ARGENTINA M, MAHADEVAN L. Fluid-flow-induced flutter of a flag [C]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, America*:2005,102(6):1829-1834.
- [15] PRIYA S. Modeling of electric energy harvesting using piezoelectric windmill [J]. *Applied Physics Letters*, 2005,87(18):184101-1-3.
- [16] LIU H C, ZHANG S S, KATHIRESAN R, *et al.*. Development of piezoelectric microcantilever flow sensor with wind-driven energy harvesting capability [J]. *Applied Physics Letters*, 2012,100(22):223905-1-3.
- [17] KNIGHT C, DAVIDSON J, BEHRENS S. Energy options for wireless sensor nodes [J]. *Sensors*, 2008,8(12):8037-8066.
- [18] 于毅, 任天令, 刘理天. 硅基 AlN 薄膜制备技术与测试分析 [J]. *半导体学报*, 2005,26(1):42-45.  
YU Y, REN T L, LIU L T. Deposition and characterization of AlN thin films on silicon [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005,26(1):42-45. (in Chinese)
- [19] SINGH A V, CHANDRA S, BOSE G. Deposition and characterization of c-axis oriented aluminum nitride films by radio frequency magnetron sputtering without external substrate heating [J]. *Thin Solid Films*, 2011,519(18):5846-5853.
- [20] CHERNG J, CHEN T, LIN C. Pulsed-DC Sputtering of Molybdenum Bottom Electrode and Piezoelectric Aluminum Nitride Films for Bulk Acoustic Resonator Applications [J]. *Thin Solid Films*, 2011,519(20):5846-5853.
- [21] 杨世才, 阿布都艾则孜·阿布来, 简基康, 等. 纯氮气反应溅射 AlN 薄膜及性质研究 [J]. *人工晶体学报*, 2010,39(1):190-196.  
YANG SH C, ABDULEZ I Z A, JIAN J K, *et al.*. Preparation and properties of Al N thin films

by pure nitrogen reactive sputtering[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2010, 39(1):190-196. (in Chinese)

- [22] TANNER S M, FELMETSGER V V. Microstructure and chemical wet etching characteristics of AlN films deposited by ac reactive magnetron sputtering [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2010, 28(1):69-76.
- [23] 于毅, 赵宏锦, 任天令, 等. 硅基 AlN 薄膜的成分与表面分析[J]. *仪器仪表学报*, 2003, 24(z2):278-279.

YU Y, ZHAO H J, REN T L, *et al.*. Component and surface analysis of AlN thin films on silicon [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2003, 24(z2):278-279. (in Chinese)

- [24] 于毅, 赵宏锦, 任天令, 等. AlN 薄膜的制备与刻蚀工艺研究[J]. *仪器仪表学报*, 2003, 24(z2):239-240.
- YU Y, ZHAO H J, REN T L, *et al.*. Study of fabrication and etching process of AlN thin films [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2003, 24(z2):239-240. (in Chinese)

#### 作者简介:



**李东玲**(1982—),女,河北秦皇岛人,博士研究生,2009年于重庆大学获得硕士学位,主要从事半导体工艺加工技术研究。E-mail:lidongling@cqu.edu.cn



**赵兴强**(1982—),男,江苏沛县人,博士研究生,2005年、2008年于重庆大学分别获学士、硕士学位,主要从事 MEMS 微能源技术基础理论研究。E-mail:zxq8562@163.com

#### 通讯作者:



**尚正国**(1981—),男,河南洛阳人,博士研究生,2009年于重庆大学获得硕士学位,主要从事半导体工艺加工技术研究。E-mail:zhengry@cqu.edu.cn

#### 导师简介:



**温志渝**(1949—),男,重庆人,教授,博士生导师,“973”首席科学家,1982年于四川大学获得学士学位,主要从事 MEMS 微能源技术及微纳器件与系统方面的研究。E-mail:wenzhiyu@cqu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)