

基于掺杂压电薄膜的 FBAR 制备及研究

兰伟豪, 徐 阳, 张永川, 蒋平英, 司美菊, 刘 娅, 卢丹丹, 何西良

(中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060)

摘要: 薄膜体声波谐振器(FBAR)具有体积小、工作频段高、性能强等优势,在滤波器领域有广泛的应用前景,其最核心的功能层为压电薄膜。本文采用磁控溅射方法,在6英寸硅片上制备了 AlScN 压电薄膜。对 AlScN 薄膜进行了分析表征,结果表明,AlScN 压电薄膜具有良好的(002)面择优取向,摇摆曲线半峰宽为 1.75° ,膜厚均匀性优于 0.6%,薄膜应力为 10.63 MPa,薄膜应力可调。制作了基于 AlScN 压电薄膜的 FBAR 谐振器,其机电耦合系数为 7.53%。在 AlN 中掺杂 Sc 能够有效提高压电薄膜的机电耦合系数,对研究 FBAR 滤波器的宽带化有重要意义。

关键词: 压电薄膜; AlScN 薄膜; 磁控溅射; 机电耦合系数; 薄膜体声波谐振器

中图分类号: TN65

文献标识码: A

文章编号: 1000-985X(2020)06-1040-04

DOI:10.16553/j.cnki.issn1000-985x.2020.06.005

Fabrication and Research of FBAR Based on Doped Piezoelectric Film

LAN Weihao, XU Yang, ZHANG Yongchuan, JIANG Pingying, SI Meiju, LIU Ya, LU Dandan, HE Xiliang

(26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: The film bulk acoustic resonator (FBAR) has the advantages such as small volume, high operating frequency and strong performance, so that it has wide application prospects in the field of filter. The most important functional layer of FBAR filter is the piezoelectric layer composed of piezoelectric materials. In this paper, AlScN piezoelectric films were prepared on 6 inch silicon substrates by magnetron sputtering. The AlScN films were analyzed and characterized. The results show that the preferred orientations for the (002) crystal face of AlScN films are excellent, the full width at half maximum (FWHM) of the rocking curve is 1.75° . The thickness uniformity of AlScN films is less than 0.6%. The film stress is 10.63 MPa, and the stress can be adjusted. FBAR resonators based on AlScN piezoelectric films were prepared. The electromechanical coupling coefficients were 7.53%. The results show that doping Sc in AlN can improve the effective electromechanical coupling coefficient, which is significance for studying the wide band FBAR filter.

Key words: piezoelectric thin film; AlScN thin film; magnetron sputtering; electromechanical coupling coefficient; FBAR

0 引 言

随着移动通信技术的快速发展,无线通信系统的工作频率不断提高,系统的集成度也要求越来越高,设备的小型化与高频化已成为必然的发展趋势。薄膜体声波谐振器(FBAR)不仅具有工作频率高、插损低的优点,而且其尺寸小,易于集成,且与 CMOS 工艺相容^[1],在无线通信的高频段,特别是 GHz 频段具有明显的优势,因此 FBAR 滤波器得到了愈来愈广泛的研究和应用。FBAR 滤波器的性能主要由其压电层决定,目前,主流的压电材料有氮化铝(AlN)、氧化锌(ZnO)和锆钛酸铅(PZT)。其中,声波在 AlN 薄膜中的传输速度更快,器件能以更小的体积达到相同的工作频率,有利于小型化与集成化;并且 AlN 固有损耗低,有利于提升器件性能;与 CMOS 工艺兼容,性质稳定易于生产加工^[2]。但在三种压电材料中,AlN 的机电耦合系数最低,导致其可实现的带宽最窄,限制了 AlN 薄膜的应用范围^[3],因此,如何提高 AlN 薄膜的压电响应成为了研究热点。2008 年, Akiyama 用铝和钪双靶材共溅射得到了氮化铝钪(AlScN)薄膜^[4],相比 AlN 薄膜, AlScN 薄膜压电系数得到显著提高。后续国外大量研究表明,通过掺杂钪(Sc)使 AlN 薄膜改性可以显著提升其压电效应^[5],这对于 FBAR 器件的性能提高意义重大。但目前,国内对大晶圆尺寸上 AlN 薄膜掺杂 Sc

作者简介: 兰伟豪(1994-),男,四川省人,工程师。E-mail: 294332676guge@gmail.com

通讯作者: 徐 阳,高级工程师。E-mail: xyxuyang@163.com

的研究和宽带 FBAR 器件的研究尚处于起步阶段。

本文采用中频磁控溅射方法,在 6 英寸硅片上制备了优质的 AlScN 压电薄膜,并分别制作了基于 AlN 和 AlScN 压电薄膜的 FBAR 谐振器样品,掺杂 Sc 的 AlN 压电薄膜提升了 AlN 薄膜的机电耦合系数。

1 实 验

1.1 AlScN 压电薄膜制备

采用 6 英寸硅单晶片为衬底材料,使用如下方法对硅基片进行清洗,首先在硫酸和双氧水混合液 ($V(\text{H}_2\text{SO}_4):V(\text{H}_2\text{O}_2)=4:1$) 中漂洗 10 min,其次在氨水、双氧水和水混合液 ($V(\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}):V(\text{H}_2\text{O}_2):V(\text{H}_2\text{O})=1:2:10$) 中漂洗 10 min,最后冲水甩干后入腔室。采用射频等离子清洗基片,采用磁控溅射方式制作底电极钼(Mo)薄膜,靶材为高纯钼靶,纯度为 99.99%,氩气(纯度为 99.999 9%)作为溅射气体。采用中频磁控溅射方法制作 AlN 种子层薄膜,靶材为高纯铝靶,纯度为 99.999%,氩气和氮气(纯度为 99.999 9%)作为溅射气体。采用中频磁控溅射方法制作 AlScN 压电薄膜,靶材为高纯铝钪合金靶,Sc 原子含量为 9.6%,氩气和氮气(纯度为 99.999 9%)作为溅射气体。制作了 AlScN(压电层)/AlN(种子层)/Mo(电极)/AlN(种子层)/Si 基结构的 AlScN 复合压电薄膜。

1.2 性能测试

使用 D8DISCOVER 型 X 线衍射仪(XRD)测量薄膜 XRD 曲线;采用 FLX-2320S 型应力测试仪测量薄膜应力;采用 F-50 型光反射式膜厚测试仪测试薄膜厚度;采用探针台测试 FBAR 器件电性能。

2 结果与讨论

2.1 AlScN 压电薄膜性能分析

在 6 英寸硅片上制作了 595 nm 厚度 Sc 原子含量为 9.6% 的 AlScN 压电薄膜,对压电薄膜厚度进行了测试,膜厚分布如图 1 所示,AlScN 膜厚平均值为 594.5 nm,膜厚均匀性为 0.51% (1sigma),AlScN 薄膜具有良好的膜厚均匀性。

研究了 AlN 种子层对 AlScN 压电薄膜(002)择优取向度的影响,在硅基上分别制作了 AlScN(压电层)/AlN(种子层)/Mo(电极)/AlN(种子层)/Si 基和 AlScN(压电层)/Mo(电极)/AlN(种子层)/Si 基两种膜层结构,对两种膜层结构样品进行了 XRD

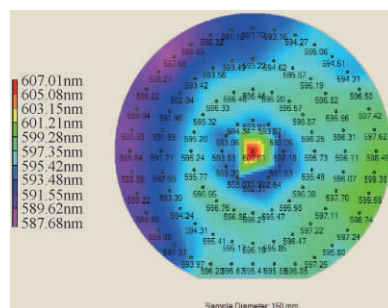


图 1 AlScN 薄膜厚度分布图

Fig. 1 Thickness distribution of AlScN film

分析,图 2(a) 和图 2(b) 分别是生长有 AlN 种子层和未生长 AlN 种子层 AlScN 薄膜(002) 面的 XRD 摇摆曲线。由图可以看出,沉积 AlN 种子层的 AlScN 压电薄膜摇摆曲线半峰宽为 1.75° ,生长的压电薄膜具有良好的(002)面择优取向。未沉积 AlN 种子层的 AlScN 压电薄膜摇摆曲线半峰宽为 2.48° 。压电薄膜(002)取向与 Mo 电极薄膜的择优取向密切相关^[6],AlScN 薄膜(002)取向还与 AlN 种子层密切相关。对比 Mo(110)薄膜和 AlScN 薄膜(002)面晶格排列,Mo(110)薄膜和 AlN(002)薄膜的晶格排列更相近。在沉积 AlScN 薄膜沉积之前生长一层种子材料 AlN,厚度通常在 20 ~ 80 nm 之间,改善了 AlScN 与 Mo 电极薄膜的晶格匹配度,通过 AlN 种子层诱导 AlScN 薄膜(002)取向的生长,从而进一步提升了 AlScN 薄膜的择优取向。

理想状况下,薄膜的应力为零,否则应力过大,会造成薄膜受力弯曲,甚至脱落,影响器件的可靠性。对溅射功率、溅射温度、溅射气体压力等工艺参数优化后,保持其它工艺参数不变,AlScN 薄膜应力可以通过溅射气体氩气的流量进行调节,AlScN 薄膜应力可以低至 10.63 MPa,如图 3 所示。AlScN 薄膜应力可以通过溅射气体氩气的流量进行调整,薄膜应力可控,氩气流量与薄膜应力满足一定的线性关系。图 4 为氩气流量对 AlScN 薄膜应力的影响图,随着氩气流量的增加,薄膜应力向张应力变化。

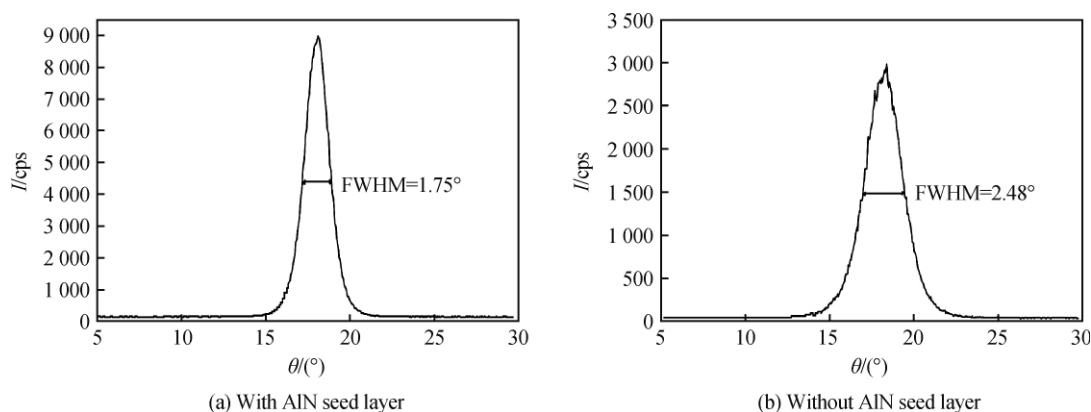


图2 AlScN 薄膜(002) 面 XRD 摇摆曲线

Fig. 2 XRD rocking curves on (002) crystal face of AlScN film

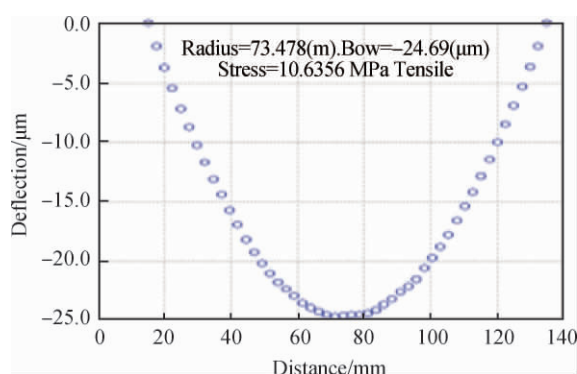


图3 AlScN 薄膜应力

Fig. 3 The stress of AlScN film

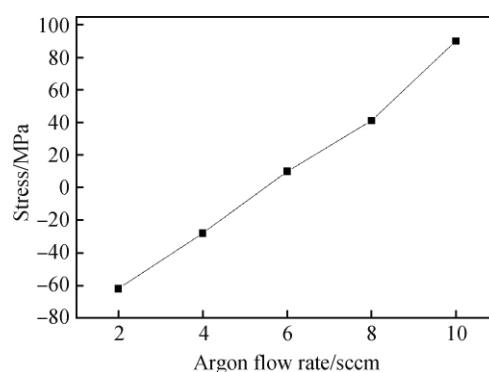


图4 氩气流量对 AlScN 薄膜应力的影响

Fig. 4 Effect of argon flow rate on the stress of AlScN film

2.2 FBAR 器件电性能分析

采用 AlScN 压电薄膜, Mo 作为电极层, 在硅基上制作了 FBAR 器件, 其结构示意图如图 5 所示。同时, 为了对比, 也采用 AlN 压电薄膜制作了 FBAR 器件。

对两种 FBAR 器件分别进行了电性能测试, 测试结果分别如图 6(a) 和图 6(b) 所示。其中, 基于 AlScN 压电薄膜的 FBAR 谐振器的谐振频率为 3.197 GHz, 反谐振频率为 3.301 GHz; 基于 AlN 压电薄膜的 FBAR 谐振器的谐振频率为 3.337 GHz, 反谐振频率为 3.422 GHz。

$$k_t^2 = (\pi^2/4) (f_s/f_p) [(f_p - f_s)/f_p] \quad (1)$$

由于压电薄膜的机电耦合系数可以反映压电薄膜的压电性, 通过 FBAR 谐振器的谐振频率 f_s 和反谐振频率 f_p , 按公式(1) 可计算得到压电薄膜机电耦合系数 k_t^2 。对测试结果进行计算, AlScN 和 AlN 压电薄膜的机电耦合系数分别为 7.53% 和 5.98%, 相对 AlN 压电薄膜, AlScN 压电薄膜的机电耦合系数得到提升, 对研究宽带 FBAR 滤波器有重要意义。

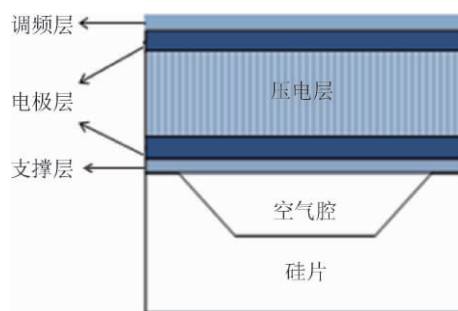


图5 FBAR 结构示意图

Fig. 5 FBAR structure diagram

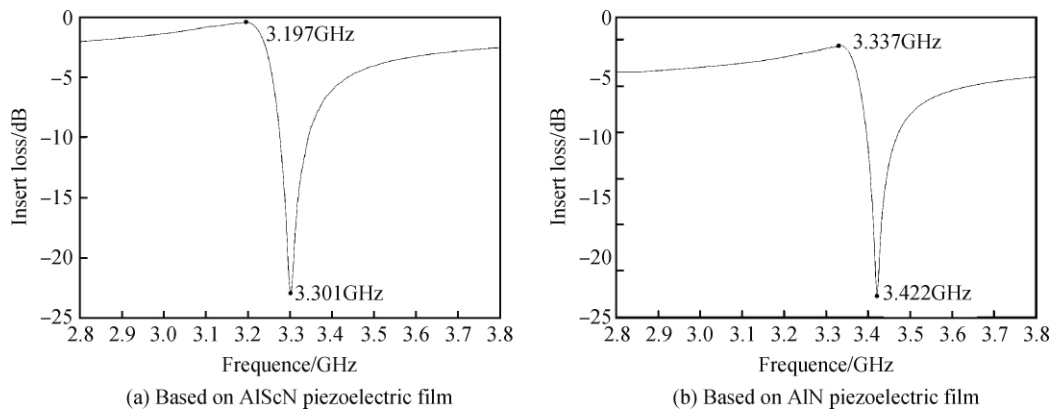


图6 FBAR 谐振器频率响应曲线

Fig. 6 Frequency response curves of FBAR resonator

3 结 论

本文使用铝钪合金靶,采用磁控溅射在6英寸硅片上制备了Sc原子含量为9.6%的AlScN压电薄膜。AlScN压电薄膜的性能分析结果表明,AlScN膜厚均匀性为0.51% (1sigma),AlScN薄膜摇摆曲线半峰宽为1.75°,AlScN薄膜应力为10.63 MPa,薄膜应力可调。制作了基于AlScN和AlN压电薄膜的FBAR谐振器,其机电耦合系数分别为7.53%和5.98%,在AlN中掺杂Sc能够有效提高压电薄膜的机电耦合系数,对国内研究掺杂Sc的AlN压电薄膜和宽带FBAR滤波器具有重要的参考意义。

参 考 文 献

- [1] 何杰,刘荣贵,马晋毅. 薄膜体声波谐振器(FBAR)技术及应用[J]. 压电与声光,2007,29(4):379-382.
- [2] Mortet V, Vasin A, Jouan P Y, et al. Aluminium nitride films deposition by reactive triode sputtering for surface acoustic wave device applications [J]. Surface & Coatings Technology, 2003,176(1):88-92.
- [3] 徐学良,陆玉姣,杨柳,等. 薄膜体声波滤波器的发展现状[J]. 压电与声光,2017,39(2):163-166.
- [4] Akiyama M, Kamohara T, Kano K, et al. Enhancement of piezoelectric response in scandium aluminum nitride alloy thin films prepared by dual reactive cosputtering [J]. Advanced Materials,2009,21(5):593-596.
- [5] Moreira M, Bjurström J, Katardjev I, et al. Aluminum scandium nitride thin-film bulk acoustic resonators for wide band applications [J]. Vacuum,2011,86(1):23-26.
- [6] 金成飞,司美菊,徐阳,等. AlN薄膜制备技术研究[J]. 压电与声光,2016,38(4):539-540.