

兰姆波型谐振器的制备与测试

邓言文, 彭斌, 张万里, 陈鹏, 王睿, 姜建英

(电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川 成都 610054)

摘要:采用磁控溅射、光刻、腐蚀、电子束蒸发等工艺,在 AlN 薄膜表面设计和制备了兰姆波(Lamb)型谐振器。研究了 Lamb 谐振器频率特性与频率-温度特性,并与传统的瑞利波(Rayleigh)型谐振器进行对比。测试结果表明, Rayleigh 谐振器的谐振频率为 305.15 MHz,温度灵敏度为 10.74 kHz/°C;而 Lamb 谐振器有 7 个谐振频率,分别为 294.630 MHz, 398.125 MHz, 435.625 MHz, 482 MHz, 531.625 MHz, 570 MHz 和 613.625 MHz,其温度灵敏度分别为 10.63 kHz/°C, 13.46 kHz/°C, 16.09 kHz/°C, 17.51 kHz/°C, 18.95 kHz/°C, 20.76 kHz/°C 和 21.86 kHz/°C。结果表明,兰姆波型谐振器高阶模式的温度灵敏度最高,达到 21.86 kHz/°C。

关键词:兰姆波型谐振器;谐振频率;温度特性;AlN 薄膜

中图分类号:TN65 **文献标识码:**A

Preparation and Testing of Lamb Wave Resonator

DENG Yanwen, PENG Bin, ZHANG Wanli, CHEN Peng, WANG Rui, JIANG Jianying

(State Key Lab. of Electronic Thin Films and Intergrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The lamb wave resonator was designed and prepared on the surface of AlN films through the magnetron sputtering, photolithography, etching, electron beam evaporation and other processes. The frequency and frequency-temperature characteristics of Lamb wave resonator were studied, and the comparison with the conventional Rayleigh wave resonator was carried out. The test results show that the resonant frequency and temperature sensitivity of Rayleigh wave resonator are 305.15 MHz, 10.74 kHz/°C respectively, while Lamb wave resonator has seven resonant frequencies which are 294.630 MHz, 398.125 MHz, 435.625 MHz, 482 MHz, 531.625 MHz, 570 MHz and 613.625 MHz respectively, the corresponding temperature sensitivity are 10.63 kHz/°C, 13.46 kHz/°C, 16.09 kHz/°C, 17.51 kHz/°C, 18.95 kHz/°C, 20.76 kHz/°C, 21.86 kHz/°C respectively. All the results indicated that the temperature sensitivity of Lamb wave resonator reaches the maximum of 21.86 kHz/°C.

Key words: Lamb wave resonator; resonant frequency; temperature characteristics; AlN films

0 引言

声表面波(SAW)传感器因具有尺寸小,低损耗,低成本及良好的声电转化性能等特点而被广泛应用于温度传感器、压力传感器、气体传感器等^[1-3]。随着 SAW 无线传感器天线小型化、器件小型化的发展,器件的工作频率要求越来越高,尺寸也越来越小。使用合适的声学模式的传感器来提高器件频率得到了极大关注^[4],其中兰姆波(Lamb)型传感器具有高声速、能应用于液体环境及可利用硅的 MEMS 工艺制作而受到关注^[5]。Bjurstrom 最早报道了 Lamb 型谐振

器^[6],随后出现了基于 Lamb 的压力、液体密度传感器^[7-9]。2009年,G. Wingqvist 等报道了温度补偿型 Lamb 传感器^[10];2012年,Chih-Ming Lin 等采用 AlN/3C-SiC 结构制作的 Lamb 谐振器中,其中,传播的高阶 Lamb 的声速达到 40 000 m/s 以上^[11]。但国内对 Lamb 谐振器在温度传感器上的应用还极少关注和研究。本文采用磁控溅射、光刻、腐蚀、电子束蒸发等工艺,以沉积了 AlN 薄膜的硅片作为基底,设计和制作了线宽为 4 μm 的单端口 Lamb 波型谐振器,研究了其本征频率特性与频率-温度特性。

收稿日期:2015-08-03

基金项目:自然科学基金资助项目(61223002)

作者简介:邓言文(1992-),男,安徽滁州人,硕士生,主要从事无线无源声表面波传感器的设计与制作。彭斌(1975-),男,四川成都人,教授,主要从事敏感材料与无线无源传感器的研究。

1 设计制作及仿真测试

图1为Lamb型谐振器的示意图,它主要由中心减薄的基底、基底上沉积的AlN薄膜、叉指换能器(IDT)和两组反射栅组成。器件设计主要是对IDT参数、反射栅参数、IDT与反射栅之间的距离等进行综合设计^[12]。

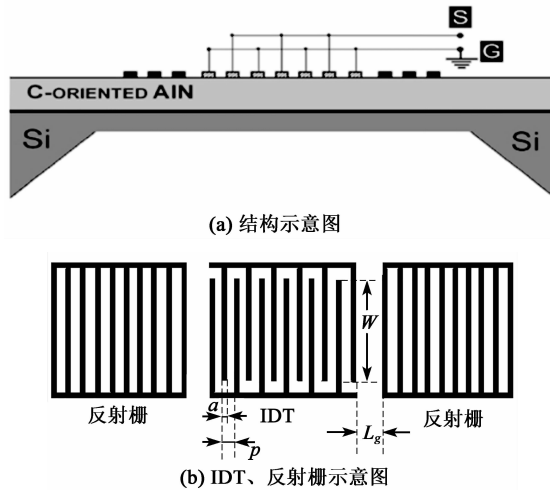


图1 Lamb型谐振器

本文设计的Lamb谐振器采用Si衬底,设器件的波长 λ 为 $16\ \mu\text{m}$,叉指宽度 a 为 $4\ \mu\text{m}$,叉指电极中心距离 $p=\lambda/2=8\ \mu\text{m}$,孔径 W 为 $1.2\ \text{mm}$,叉指对数为40对,反射栅对数为145对。金属化比率 $\eta=a/p=0.5$,反射栅与IDT的间距 $L_g=4\ \mu\text{m}$,硅基片厚为 $25\ \mu\text{m}$ 。为了对比,本文还制作了瑞利波(Rayleigh)谐振器,除了不用减薄硅基底,其余与Lamb谐振器相同。

采用COMSOL软件分别对两种谐振器进行仿真,通过频率响应仿真得到频率导纳曲线,进而得到谐振频率。通过本征频率可得声波的振动模式,进而可得到声波能量的分布情况,结果如表1所示。

表1 Rayleigh、Lamb型谐振器谐振频率

传播模式	中心频率/MHz
Rayleigh	306.08
Lamb模式1	297.80
Lamb模式2	398.80
Lamb模式3	448.20
Lamb模式4	500.40
Lamb模式5	531.34
Lamb模式6	584.60
Lamb模式7	615.23

制作Lamb型谐振器的工艺流程如图2所示。实验中所用的硅基片的一面生长有 SiO_2 (厚度为 $300\ \text{nm}$),首先采用氢氟酸局部腐蚀基片背面的 SiO_2 ,露出Si而形成窗口;然后采用磁控溅射法在正面Si基底上生长厚 $1.44\ \mu\text{m}$ 的AlN压电薄膜,随后采用光刻剥离技术直接在AlN薄膜上制作所设计的IDT与反射栅。选择Au作为金属电极,采用电子束蒸发技术沉积了厚为 $200\ \text{nm}$ 的Au电极。在制作Au电极前,首先在基片上生长一层厚为 $10\ \text{nm}$ 的Ti电极作为缓冲层。最后,用硅胶将器件正面保护起来后将器件放入质量分数为30%的KOH溶液中,在 $80\ ^\circ\text{C}$ 下腐蚀2h,将硅基减薄至 $25\ \mu\text{m}$,最终得到Lamb谐振器。

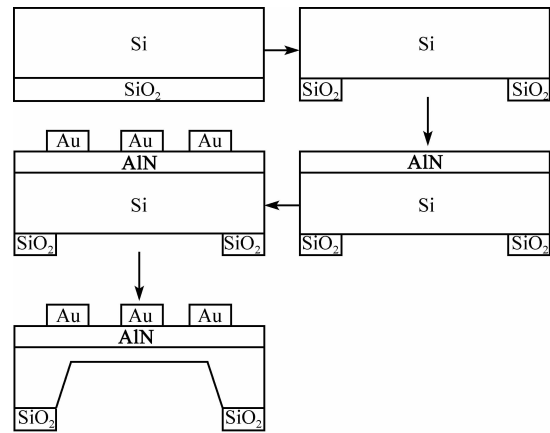


图2 Lamb型谐振器的制作工艺

最终制备出的Lamb型谐振器如图3所示,其中心区域硅基厚为 $25\ \mu\text{m}$;而Rayleigh型谐振器的硅基厚为 $200\ \mu\text{m}$ 。

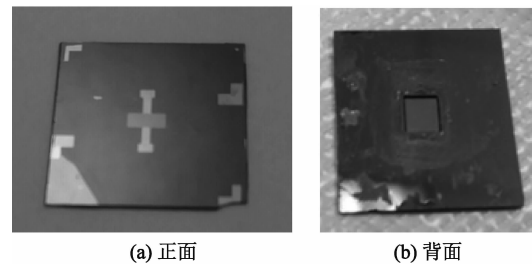


图3 Lamb型谐振器的实物图

采用矢量网络分析仪(Agilent N5234A)分别测量了制备所得的Lamb谐振器和Rayleigh谐振器的群时延特性,从群时延特性可以得到器件的谐振频率。为了测试不同温度下Lamb谐振器和Rayleigh谐振器的频率特性,分别将其放入一个温控箱中,连续测试了其在升、降温过程中,不同温度下的频率特性。

2 结果与讨论

图 4 为 Lamb 谐振器和 Rayleigh 谐振器的群时延特性曲线。由图可看出,在 250~800 MHz 的激励频率范围内,Lamb 谐振器共激励了 7 个模式的声波,其谐振频率分别为 294.630 MHz,398.125 MHz,435.625 MHz,482 MHz,531.625 MHz,570 MHz 和 613.625 MHz,这与表 1 中的仿真结果基本相符。Rayleigh 谐振器的谐振频率为 305.15 MHz,与仿真结果也基本相同。声表面波谐振器的谐振频率 f_0 和波长 λ 的关系为

$$f_0 = v_s / \lambda \quad (1)$$

式中 v_s 为 SAW 在压电材料中的传播速度。利用式 (1) 可以计算出 7 个模式对应的 v_s 分别为 4 714 m/s, 6 370 m/s, 6 970 m/s, 7 712 m/s, 8 506 m/s, 9 120 m/s 和 9 978 m/s。其中最大声速为 9 978 m/s,与文献中 Lamb 型传感器的声速 (10 000 m/s)^[13] 吻合,而 Rayleigh 传播的声速仅为 4 882 m/s。

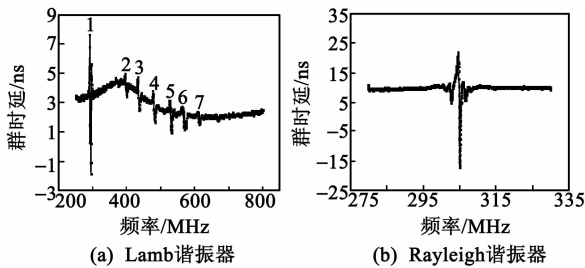


图 4 群时延测试结果曲线

图 5 为两种谐振器升、降温测试后得到的频率-温度曲线。其中图 5(a) 为 Lamb 谐振器最高频率模式,即模式 7 的循环温度测试曲线。图 5(b) 为 Rayleigh 谐振器的温度循环测试曲线。由图 5 可见,升、降温测试的频率-温度曲线基本重合,表明这两个器件的频率-温度特性均很稳定。

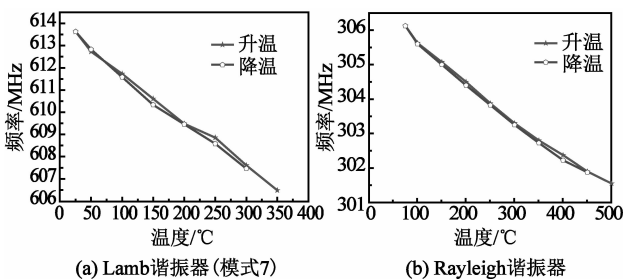


图 5 器件谐振频率随温度变化曲线

分别对 Lamb 谐振器的 7 个模式及 Rayleigh 谐振器进行温度特性测试,测试结果如图 6 所示。频率偏移量是不同模式在各个温度下的中心频率与

常温下 (25 °C) 中心频率之差,由图可见,各个模式的线性度都非常好,模式 1~7 线性拟合的斜率绝对值逐渐变大;而 Rayleigh 的斜率在模式 1、2 之间。通过线性拟合可得斜率的具体数值,从而得出各个模式与 Rayleigh 的温度灵敏度,其结果如表 2 所示。

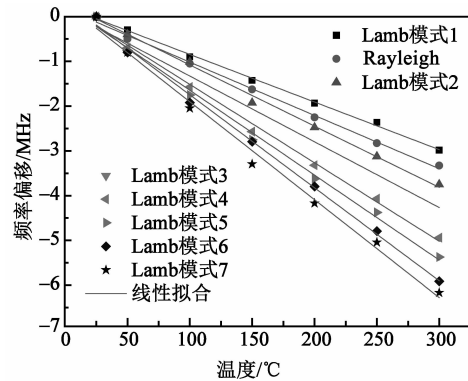


图 6 Lamb 与 Rayleigh 谐振器的谐振频率-温度特性

表 2 Rayleigh、Lamb 温度传感器灵敏度

传播模式	中心频率/MHz	灵敏度/(kHz/°C)
Rayleigh	305.150	10.74
Lamb 模式 1	294.630	10.63
Lamb 模式 2	398.125	13.46
Lamb 模式 3	435.625	16.09
Lamb 模式 4	482.000	17.51
Lamb 模式 5	531.625	18.95
Lamb 模式 6	570.000	20.76
Lamb 模式 7	613.625	21.86

由表 2 可看出,器件的中心频率越高,即所激励声波的声速越高,其对温度的灵敏度越高。模式 1 的声速低于 Rayleigh,因此其对温度的灵敏度低于 Rayleigh,而其他模式的声波的声速都比 Rayleigh 高,对温度的灵敏度也比 Rayleigh 高。其中,Lamb 模式 7 的温度灵敏度达到 21.86 kHz/°C,这是 Rayleigh 型温度传感器的灵敏度的 2 倍多。通过实验对比发现,Lamb 谐振器不仅可以激励多种模式的声波,且采用其中最高声速的模式对温度传感时,其工作频率和温度灵敏度都比 Rayleigh 型温度传感器的高。

3 结束语

本文采用磁控溅射、光刻、腐蚀、电子束蒸发等工艺,在 AlN 薄膜表面分别制作了瑞利波型和兰姆波型谐振器。通过减薄硅基厚度而使得传感器传播较高声速模式的兰姆波,得到兰姆波型谐振器。研

究表明,在 250~800 MHz 的激励频率范围内,制作的兰姆波型谐振器有 7 个模式,每个模式的谐振频率与仿真结果基本相同,且随温度变化均呈良好的线性关系。其中,最高的谐振频率为 613.625 MHz,对应的温度灵敏度为 21.86 kHz/°C,是相同结构瑞利波型谐振器的 2 倍多,适用于制备 SAW 传感器件。

参考文献:

- [1] LEE K, WANG W, KIM T, et al. A novel 440 MHz wireless SAW microsensor integrated with pressure-temperature sensors and ID tag[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2007, 17(3): 515.
- [2] RODRIGUEZ-MADRID J G, IRIARTE G F, WILLIAMS O A, et al. High precision pressure sensors based on SAW devices in the GHz range[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 189: 364-369.
- [3] WEN C B, JU Y F, LI W L, et al. Carbon dioxide gas sensor using SAW device based on ZnO film[C]//S. I.: *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 135: 347-352.
- [4] CALIENDO C, IMPERATORI P. High-frequency, high-sensitivity acoustic sensor implemented on ALN/Si substrate[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(8):1641-1643.
- [5] 张淑仪,周凤梅,范理. 表面声波传感器及其应用[J]. *应用声学*, 2008, 27(6): 413-418.
- [6] BJURSTRÖM J, KATARDJIEV I, YANTCHEV V. Lateral-field-excited thin-film Lamb wave resonator[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(15): 4103.
- [7] ANDERÅS E, KATARDJIEV I, YANTCHEV V. Lamb wave resonant pressure micro-sensor utilizing a thin-film aluminium nitride membrane[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2011, 21(8): 085010.
- [8] 施文康,马伟方. 基于兰姆波技术的液体密度声传感器[J]. *上海交通大学学报*, 2001, 35(9): 1340-1342.
- [9] KROPELNICKI P, MUCKENSTURM K M, MU X J, et al. CMOS-compatible ruggedized high-temperature Lamb wave pressure sensor[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2013, 23(8): 085018.
- [10] WINGQVIST G, ARAPAN L, YANTCHEV V, et al. A micromachined thermally compensated thin film Lamb wave resonator for frequency control and sensing applications[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009, 19(3): 1-9.
- [11] LIN C M, CHEN Y Y, VALERY V F, et al. AlN/3C-SiC composite plate enabling high-frequency and high-Q micromechanical resonators[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(20): 2722-2727.
- [12] 潘峰. 声表面波材料与器件[M]. 北京:科学出版社, 2012.
- (上接第 400 页)
- [4] 马晋毅,江洪敏,汤劲松. 高性能 C 波段声体波微波延迟线[J]. *压电与声光*, 2008, 30(3):255-257.
- MA Jinyi, JIANG Hongmin, TANG Jinsong. High performance BAW microwave delay line at C waveband[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2008, 30(3): 255-257.
- [5] 朱昌安,郑泽渔,李世红,等. 2 μs 低损耗声体波微波延迟线[J]. *压电与声光*, 2010, 32(4):521-523.
- ZHU Chang'an, ZHENG Zeyu, LI Shihong, et al. 2 μs low loss BAW microwave delay line[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2010, 32(4):521-523.