

背腔刻蚀型横向激励薄膜体声波谐振器制备技术研究

徐阳^{1,2}, 司美菊^{1,2}, 吴高米^{2,3}, 刘文怡^{1,2}, 巩乐乐^{2,3}, 甄静怡^{1,2}, 余奇^{2,3}, 陈金琳^{1,2}

(1. 中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060; 2. 国知创芯(重庆)科技有限公司, 重庆 401332;

3. 中电科芯片技术(集团)有限公司, 重庆 401332)

摘要:随着移动通信技术的快速发展, 薄膜体声波滤波器逐渐向高频和大带宽方向发展。该文研究了 POI (LiNbO₃/SiO₂/Si) 基片上背腔刻蚀型横向激励薄膜体声波谐振器制作工艺, 通过研究 POI 基 IDT 光刻、背腔硅刻蚀等工艺, 确定了 IDT 层曝光量和背腔刻蚀等关键工艺参数。研制出的背腔刻蚀型横向激励薄膜体声波谐振器, 其谐振频率为 4 565 MHz, 反谐振频率为 5 035 MHz, 机电耦合系数为 20.86%。此制备工艺对研究高频、大带宽薄膜体声波滤波器具有重要的参考意义。

关键词:干法刻蚀; 刻蚀速率; 横向激励; 机电耦合系数; 薄膜体声波谐振器

中图分类号: TN305.7; TN65 **文献标识码:** A

The Study of Based on Back Cavity Etching and Lateral Exciting Film Bulk Acoustic Resonator

XU Yang^{1,2}, SI Meiju^{1,2}, WU Gaomi^{2,3}, LIU Wenyi^{1,2}, GONG Lele^{2,3},

ZHEN Jingyi^{1,2}, YU Qi^{2,3}, CHEN Jinlin^{1,2}

(1. The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China;

2. NIICAS (Chongqing) Technology Co., Ltd, Chongqing 401332, China;

3. Academy of Chips Technology, China Electronics Technology Group, Chongqing 401332, China)

Abstract: With rapid development in mobile technology, film bulk acoustic resonators have developed in a high frequency and wide bandwidth direction. This study focuses on the technological process of back cavity etching and a lateral exciting film bulk acoustic resonator on the POI (LiNbO₃/SiO₂/Si). On the study of the IDT optical lithography, etching and back cavity corrosion, the critical process parameters are determined. The frequency response curve shows that resonance and antiresonance frequencies were 4 565 and 5 035 MHz, respectively. The effective electromechanical coupling coefficient was 20.86%, which is significant for research on high frequency and wide bandwidth film bulk acoustic resonators.

Key words: dry etch; etch rate; lateral exciting; electromechanical coupling coefficient; film bulk acoustic resonator

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, 系统集成度要求越来越高, 系统的小型化和高频化成为发展趋势。滤波器作为移动通信射频模块的关键器件, 在通信领域起着重要作用^[1]。射频前端模块中的滤波器主要是基于声表面波(SAW)谐振器和体声波(BAW)谐振器的射频声学滤波器, 两种滤波器是应用最广泛、技术发展最完备的压电声学器件^[2]。SAW 滤波器采用

传统声表面波波动模式, 难以满足 3 GHz 以上的高频需求^[3-4], 且无法与集成电路工艺兼容, 无法进行功能拓展, 不符合微型化、集成化的要求。BAW 滤波器可与其他电子器件制造工艺相兼容, 但高频器件对压电薄膜的性能要求较高, 且膜厚较薄。AlN 和 AlScN 压电薄膜机电耦合系数不高, 限制了其在高频、大带宽方向的应用。横向激发薄膜体声波谐振器利用兰姆波工作模式, 最高机电耦合系数 $>20\%$, 滤波器最大相对带宽 $>10\%$ 。通过激发不同模式

收稿日期: 2024-04-07

作者简介: 徐阳(1981-), 男, 四川省南充市人, 高级工程师。

兰姆波,谐振器频率可达到 X 波段,甚至达到 Ku 波段。此外,横向激发薄膜体声波谐振器的谐振频率由叉指电极的间距决定,在同一掩模版内可以设计多种间距的谐振器,一次光刻工艺可在单片晶圆上制造出多种谐振频率的器件。横向激发薄膜体声波谐振器在未来通信系统的高频宽带滤波器件领域具有非常大的应用前景^[5-6]。横向激励薄膜体声波谐振器主要由叉指电极、单晶压电薄膜、硅衬底和介质层构成,常用的结构有 3 种:空气隙型、布喇格反射型和背腔刻蚀型。空气隙型谐振器的稳定性和散热能力较差;布喇格反射型结构对压电薄膜、布喇格反射层的膜厚与均匀性要求非常高,而且频率越高,薄膜厚度越薄,制备工艺难度越大,限制了其在高频的应用;背腔刻蚀型谐振器由于振子四周均与基底连接,与空气隙型相比,其具有更高的机械稳定性和更好的散热能力,工艺可行性更强。

本文研究了背腔刻蚀型横向激励薄膜体声波谐振器制作工艺,通过 IDT 光刻工艺、背面硅刻蚀、氧化硅腐蚀等工艺开发,制备出图形完整、无杂波

1 实验

采用 6 英寸(1 in=2.54 cm)POI 片(LiNbO₃/SiO₂/Si)作为衬底材料。POI 片结构包括单晶压电层 LiNbO₃ 薄膜(400 nm)/SiO₂(500 nm)/硅基(500 μm)。图 1 为具体工艺流程图。

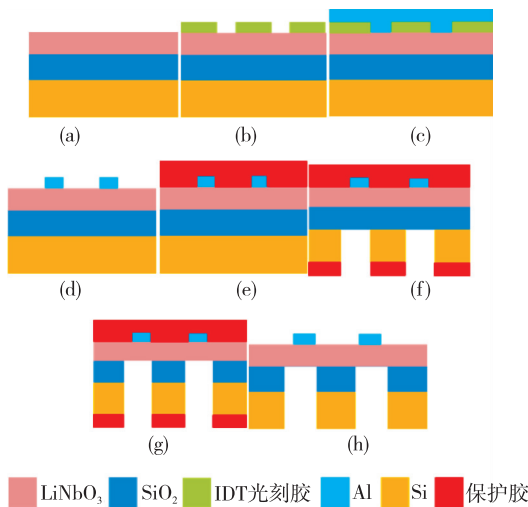


图 1 工艺流程图

由图 1 可见,工艺流程如下:(a)基片清洗。分别采用清洗剂 and NH₄OH:H₂O₂:H₂O 溶液超声去除表面有机物和颗粒。(b)采用光刻负胶进行

IDT 层光刻。(c)电子束蒸发 IDT 层 Al 薄膜,蒸发前使用等离子清洗。(d)采用剥离液剥离 IDT。(e)正面涂覆保护胶,在谐振腔制作时保护正面 IDT 图形。(f)背腔光刻和刻蚀获得谐振腔,背腔采用深硅干法刻蚀。(g)采用 HF 湿法腐蚀去除氧化硅。(h)使用氧等离子干法去除正面保护胶。

2 结果及讨论

2.1 POI 基 IDT 制作

在 POI 基片上制作 IDT 图形,研究不同光刻曝光量对 IDT 图形线宽的影响。图 2 为 IDT 图形线宽和曝光量的关系。

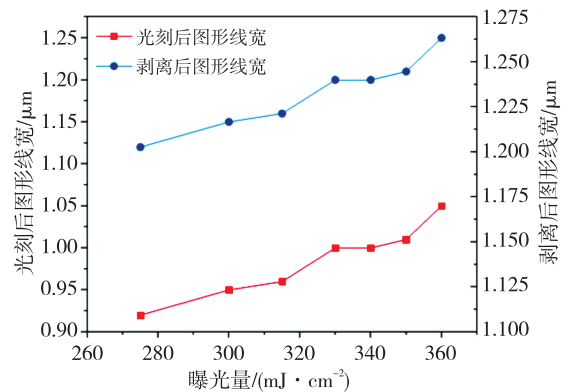


图 2 IDT 图形线宽和曝光量关系

由图 2 可以看出,随着曝光量的增大,光刻胶感光区域增大,线宽增大。由于电子束蒸发会影响光刻胶形貌,导致剥离后线宽与光刻后线宽存在差异,剥离后线宽与光刻后线宽差距约 0.2 μm。当曝光量为 330~340 mJ/cm² 时,剥离后的图形线宽为 1.2 μm,线宽实际值和线宽设计值吻合,故选择 IDT 层剥离光刻曝光量为 340 mJ/cm²。

图 3 为 IDT 层光刻后的剖面形貌图,光刻胶剖面形貌更倾向于“倒梯形”,易剥离。图 4 为 IDT 图形外观显微图, IDT 图形剥离完整,剥离后指条整齐、均匀。

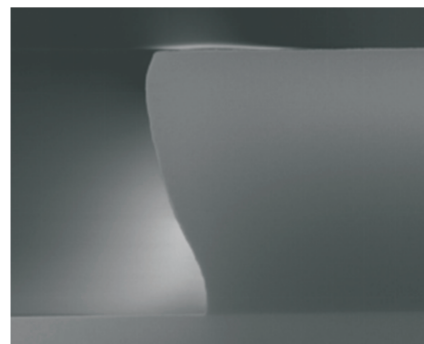


图 3 IDT 光刻剖面 SEM 图



图4 IDT剥离后显微镜图

2.2 POI基背腔制作

POI基背腔制作包括厚度 $500\ \mu\text{m}$ 的硅刻蚀和厚度 $500\ \text{nm}$ 的 SiO_2 湿法腐蚀。硅刻蚀采用深硅刻蚀工艺,通过调节干法刻蚀的射频功率、腔室气压、气体流量等工艺参数,研究了不同工艺条件对光刻胶选择比和刻蚀速率的影响,如图5所示。由图可见,当背腔硅刻蚀功率为 $65\ \text{W}$ 时,刻蚀速率最大为 $40\ \mu\text{m}/\text{min}$,此时硅对光刻胶选择比为 $50:1$ 。同时,随着刻蚀功率的增加,刻蚀速率增加,主要原因是刻蚀功率对刻蚀速率影响较大,当刻蚀功率增加,离子动能变大,刻蚀能力增强。但当功率增加到一定程度后,刻蚀速率不变甚至变小,主要原因是反应刻蚀气体离子动能占比减小。随着刻蚀功率的增加,对光刻胶的选择比逐渐减小,其原因是功率越大,对光刻胶的轰击越强。

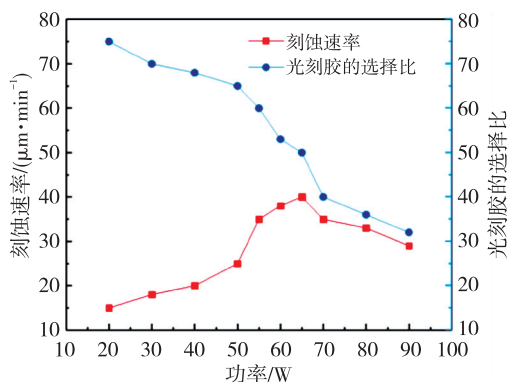


图5 刻蚀功率对刻蚀速率和光刻胶选择比的影响

为了减小去除氧化硅时对 LiNbO_3 薄膜的损伤,去除氧化硅采用湿法腐蚀,腐蚀溶液为氢氟酸、氟化铵和水的混合液体。图6为腐蚀后谐振器的正面形貌,谐振器正面图形完整,无损伤。图7为谐振器背腔形貌,POI基 LiNbO_3 薄膜下表面光滑,无残留粘附物。

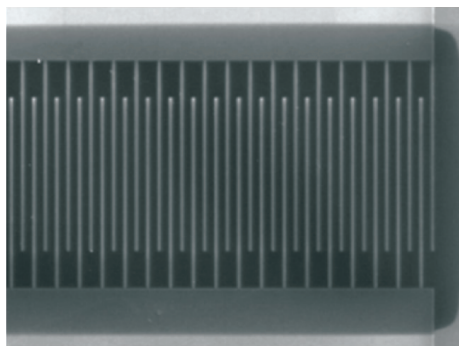


图6 谐振器正面 SEM 图

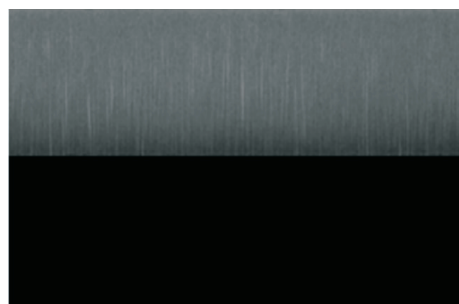


图7 晶圆背腔 FIB 图

2.3 谐振器电性能测试

采用 POI 晶圆制作了背腔刻蚀型横向激励薄膜体声波谐振器,其电性能测试与仿真的曲线如图8所示。谐振器主要性能指标:谐振频率 f_s 为 $4\ 565\ \text{MHz}$,反谐振频率 f_p 为 $5\ 035\ \text{MHz}$ 。其机电耦合系数 k_t^2 为

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

经计算, $k_t^2 = 20.86\%$ 。

图8为谐振器仿真和测试曲线对比图。由图可见,谐振器的品质因数 Q_s 和 Q_p 分别为 $1\ 245$ 和 $1\ 051$,仿真曲线与测试曲线吻合较好。测试结果的品质因数数值略低于设计值,其主要原因在于谐振器附加电容和接触电阻等寄生效应使得品质因数恶化,可通过去嵌技术进行改善。

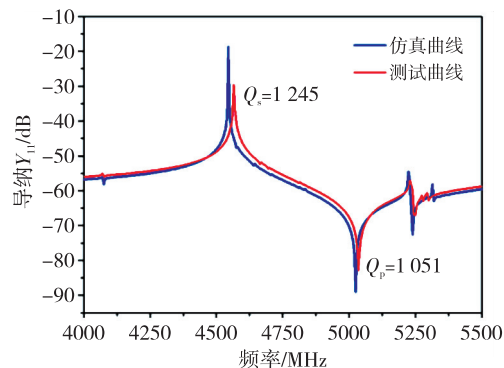


图8 谐振器仿真和测试曲线对比

3 结束语

本文通过研究背腔刻蚀型横向激励薄膜体声波谐振器制作工艺,突破了XBAR谐振器IDT层和背腔图形制备等工艺技术,获得适合的IDT层制备曝光量、背腔刻蚀速率和选择比等相关工艺参数,研制出背腔刻蚀型横向激励薄膜体声波谐振器。该谐振器的谐振频率为4 565 MHz,反谐振频率为5 035 MHz,机电耦合系数为20.86%,这对研究高频、大带宽薄膜体声波滤波器具有重要的参考意义。

参考文献:

- [1] HASSAN M E, MOREIRA C P, SHIRAKAWA A A, et al. A multistandard RF receiver front-end using a reconfigurable FBAR filter [C]// [S. l.]: IEEE North-east Workshop on Circuits & Systems, IEEE, 2006.
- [2] 何杰,马晋毅,胡少勤,等.基于LN/LT-POI多层结构的SAW器件发展[J].压电与声光,2020,42(6):864-870.
- HE Jie, MA Jinyi, HU Shaoqin, et al. Development of SAW devices on LN/LT-POI multilayered structure [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2020, 42(6): 864-870.
- [3] SOUMYA Y, VICTOR P, JULIUS K, et al. Analysis of XBAR resonance and higher order spurious modes [C]//Glasgow, England: IEEE International Ultrasonics Symposium(IUS), 2019.
- [4] 杜如帆,田亚会,张巧珍,等.用于射频滤波器的LN单晶薄膜XBAR的性能研究[J].压电与声光,2022,44(5):678-681.
- DU Rufan, TIAN Yahui, ZHANG Qiaozhen, et al. Study on properties of LN single crystal thin film XBAR for RF filters[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2022,44(5):678-681.
- [5] PLESSKY V, YANDRAPALLI S, TURNER P J, et al. 5 GHz laterally-excited bulk-wave resonators (XBARs) based on thin platelets of lithium niobate [J]. Electronics Letters,2019,55(2):98-100.
- [6] 于晓权,何杰,马晋毅.压电MEMS兰姆波器件技术的最新进展与展望[J].压电与声光,2022,44(2):223-229.
- YU Xiaoquan, HE Jie, MA Jinyi. Recent advances and prospects of Lamb wave devices based on piezo-MEMS [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2022, 44(2): 223-229.