

K 波段 BAW 器件技术研究

毛世平,李文豪,江洪敏,郑泽渔

(中国电子科技集团公司第二十六研究所,重庆 400060)

摘要:通过优化高频换能器设计、极薄压电薄膜制备等技术,试制出了 K 波段 BAW 延迟线样品。其工作中心频率为 23.8 GHz,插入损耗为 51.9 dB,带宽为 1 122 MHz,延迟时间为 299 ns,直通抑制为 29 dB,3 次渡越抑制为 40 dB。

关键词:体声波(BAW);延迟线;换能器;压电薄膜

中图分类号: TN65

文献标识码: A

DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2018.03.001

Study on K Band BAW Device Technology

MAO Shiping, LI Wenhao, JIANG Hongmin, ZHENG Zeyu

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

Abstract: By optimizing the high frequency transducer design and extra thin piezoelectric film preparation technique, a BAW delay line same operated at K band has been fabricated in this work. The operating center frequency of 23.8 GHz, insertion loss of 51.9 dB, bandwidth of 1 122 MHz, delay time of 299 ns, feed through suppression (FTS) of 29 dB and triple transmitting suppression (TTS) of 40 dB have been achieved.

Key words: BAW; delay line; transducer; piezoelectric film

0 引言

体声波(BAW)微波延迟线具有损耗低、体积小、质量小、温度稳定性及衰减稳定性好等优点,广泛应用于雷达、高度表、目标模拟及电子对抗等军用电子系统^[1]。

本文针对 BAW 器件频率提升到 K 波段后出现的一系列设计和工艺制备技术难题,通过设计、工艺技术的研究和攻关,开展换能器拓扑结构优化设计、腔体结构和可调的微带匹配网络设计与攻关,初步探索了 K 波段 BAW 延迟线的设计和工艺制备新方法。突破了相关设计和工艺技术难题,在高频低损耗换能器设计,倒置换能器工艺方案,极薄压电薄膜生长,换能器阻抗匹配等方面取得了技术创新和突破,试制出了 K 波段 BAW 延迟线样品。

1 设计原理

BAW 微波延迟线的工作原理是:微波电通过换能器的逆压电效应,将电信号转变为声信号经输入匹配网络耦合到输入薄膜换能器,声信号在传声

介质中传播,当声信号到达输出薄膜换能器时,通过换能器的压电效应将声信号转变为电信号,并经输出匹配网络输出。

BAW 微波延迟线主要组成部分包括:输入和输出薄膜换能器、传声介质、输入和输出匹配网络等。其中,薄膜换能器由底电极、氮化铝(AlN)薄膜和上电极组成,如图 1 所示。



图 1 BAW 微波延迟线和薄膜换能器结构示意图

2 设计实例

2.1 声传输介质的材料选择

BAW 延迟线的延迟时间主要由声传输介质的长度决定,而选取具有较低的声传播损耗因子的介质材料对降低整个器件的插入损耗有重要影响。针对本研究中器件频率非常高的特点,我们选用 YAG 材料作为声传输介质材料。

收稿日期:2018-04-26

基金项目:国家科技部重点研发计划项目资助

作者简介:毛世平(1978-),男,重庆云阳人,高级工程师,硕士,主要从事 SAW/BAW 器件的研究。E-mail:13883674379@139.com。

2.2 换能器设计

体声波微波延迟线的插入损耗主要由5部分组成:输入、输出换能器的结合层损耗(2×BL)、反射损耗(2×TRL)、转换损耗(2×TCL)、声传播损耗(ML)和衍射损耗(DL)。

当工作频率一定时,传输损耗与延迟时间成正比。本项目中工作频率要达到K波段,因此,设计延迟线时应重点考虑换能器的设计,降低换能器的转换损耗,从而降低延迟线的插入损耗。

在极薄电极和小串联电阻时,换能器转换损耗 L_c 为

$$L_c = 10\lg \frac{4R_0R_a}{(R_0 + R_a)^2 + (X_a - \frac{1}{\omega C_0})^2} \quad (1)$$

其中,

$$R_a = \left(\frac{4k_t^2}{\pi r_D}\right) \left(\frac{1}{\omega_0 C_0}\right) \times \frac{(r_D/2)^2 (1 - \cos\theta_0)^2}{(\sin\theta_0)^2 + (r_D \cos\theta_0)^2} \quad (2)$$

$$X_a = \left(\frac{4k_t^2}{\pi r_D}\right) \left(\frac{\sin\theta_0}{2\omega_0 C_0}\right) \frac{1 + \left(\frac{r_D^2}{2} - 1\right) \cos\theta_0}{(\sin\theta_0)^2 + (r_D \cos\theta_0)^2} \quad (3)$$

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{t} \quad (4)$$

$$\theta_0 = \pi f / f_0 \quad (5)$$

$$r_D = Z_D / Z_0 \quad (6)$$

式中: R_0 为源内阻; R_a 、 X_a 分别为换能器辐射阻抗的实部和虚部; k_t 为薄膜换能器的机电耦合系数; S 为换能器的有效面积; Z_D 、 Z_0 分别为传声介质和压电薄膜的声阻抗; f 为工作频率; f_0 为1/2波长换能器对应频率^[2-3]。

通过对 L_c 的理论计算和仿真,得到18~28 GHz、换能器有效面积 $(1.0 \sim 0.8) \times 10^{-3} \text{ mm}^2$ 范围内 L_c 的变化曲面图,如图2所示。根据计算结果,我们选择适合的设计参数,设计了K波段BAW器件。

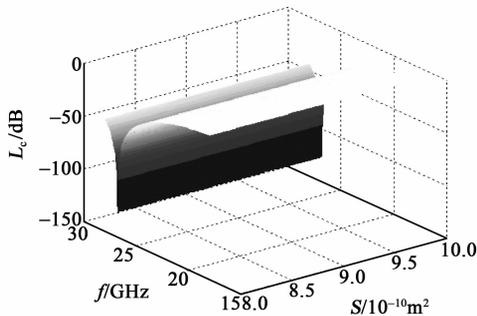


图2 K波段BAW延迟线仿真曲线

2.3 换能器材料选择

在BAW器件中,ZnO和AlN是常用的换能器压电材料。因其膜厚与频率成反比,与声速成正比,在膜厚非常薄的情况下,要制备高质量的薄膜很难。因此,针对K波段如此高的频率,必须选用声速较高的压电材料,使得膜厚尽量大,以减轻制备工艺的难度。ZnO的机电耦合系数比AlN大,但后者的声速高,适合制作更高频率的换能器。针对这一情况,本研究中选择声速较高的AlN材料作为K波段BAW器件的压电材料。同时,选用与传声介质声阻抗相匹配的金属材料作为底电极以达到降低结合层损耗的作用^[4-5]。

2.4 K波段BAW延迟线制备

BAW延迟线工艺流程图如图3所示。

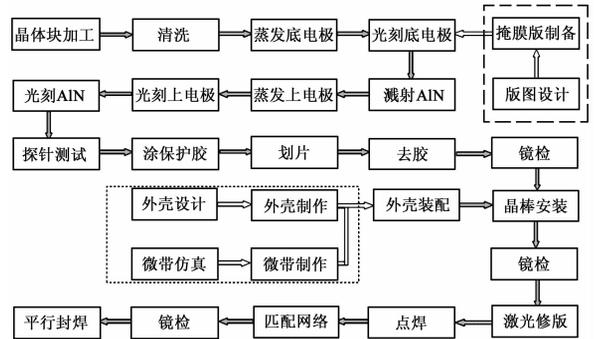


图3 工艺流程图

K波段BAW延迟线中AlN薄膜厚度在200~320 nm,在该厚度条件下不易获得较好的AlN结晶。图4是在AlN种子层上制备的Au/AlN结构。由图可见,在Au上生长的初始AlN层存在约200 nm的过渡层。该过渡层存在从非晶态到晶态的转换,因此结晶性能不是很好。图5是Au上不同

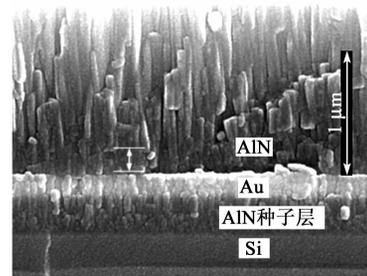


图4 在AlN种子层上生长的Au/AlN结构

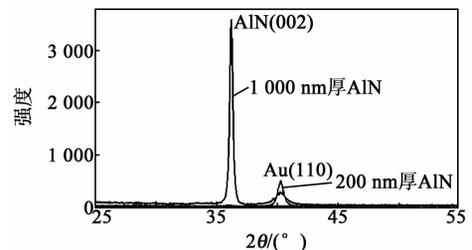


图5 不同厚度条件下AlN薄膜结晶性能差异

AlN 厚度条件下,AlN 的 XRD 图谱。由图 5 可见,AlN 厚度为 200 nm 时,(002)取向结晶性能很差;当厚度增加到 1 000 nm 后,(002)取向明显增强。由图 6 可见,AlN 厚度在 1 000 nm 时,可观察到表面晶粒;而在 200 nm 厚时,结晶不明显。

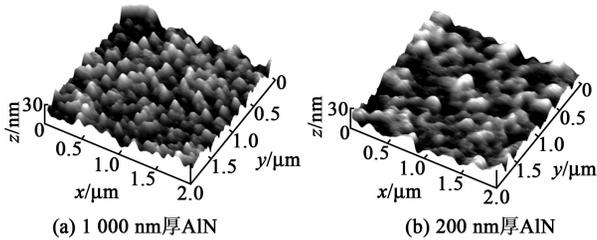


图 6 不同厚度条件下 AlN 表面形貌差异

为了研制出可实现 K 波段信号延迟的器件,压电薄膜 AlN 的厚度必须控制在 200~320 nm。由图 4 可见,如此薄的 AlN 材料可能无法获得好的结晶,因此需要分步进行验证和改进。改进从以下两方面着手:

1) Au 电极材料质量。200~320 nm 的 AlN 很薄,要求衬底材料的匹配性一定要好,因此,Au 电极的结晶质量直接影响了 AlN 层的质量。故而先考虑调整底电极沉积工艺,观察 Au 电极结晶质量对 AlN 成膜有何影响。

2) AlN 工艺调整。为了获得在很薄的情况下 Au 上很好的 AlN 多晶薄膜,考虑对 AlN 薄膜工艺进行调整。首先考虑的是沉积速率,尝试降低沉积速率使得 AlN 薄膜在沉积过程中更加充分地结晶;此外,可采用组合的工艺条件消除材料晶格不匹配的影响,即在沉积过程中采用多种工艺条件,先获得一层 20~50 nm 混晶的 AlN 层,消除 Au 电极表面匹配性影响,然后再采用正常工艺加厚镀层。

通过上述工艺改进后,制备出的薄膜性能良好,满足需要。图 7 为制备的 AlN 薄膜的 XRD 摇摆曲线。

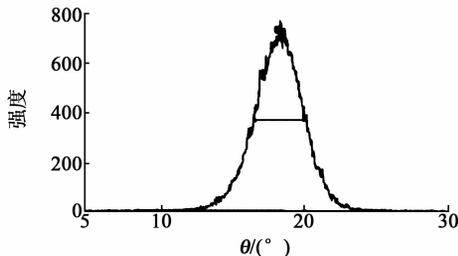


图 7 AlN 薄膜 XRD 摇摆曲线

2.5 测试结果

通过以上研究,研制出 K 波段 BAW 延迟线,时域测试曲线如图 8 所示,幅频响应测试曲线如图 9 所示。器件工作中心频率为 23.8 GHz,插入损耗为

51.9 dB,带宽为 1 122 MHz,延迟时间为 299 ns,直通抑制为 29 dB,3 次渡越抑制为 40 dB。

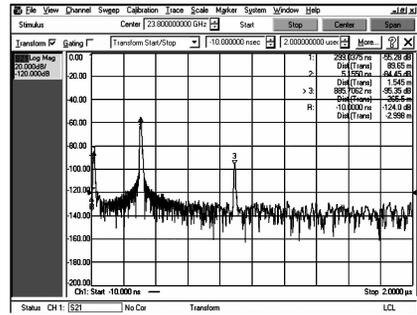


图 8 BAW 延迟线时域测试图

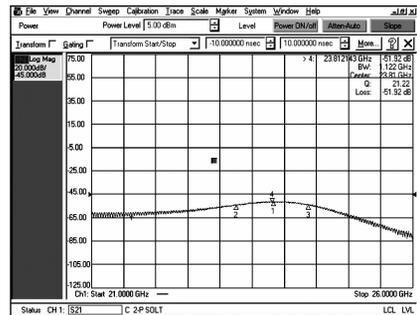


图 9 BAW 延迟线幅频响应测试图

3 结束语

本文针对 K 波段 BAW 延迟线,开展了换能器设计、极薄 AlN 压电薄膜的制备等关键技术攻关,初步探索了 K 波段 BAW 延迟线的设计和工艺制备新方法。试制出了 K 波段 BAW 延迟线样品,其工作中心频率为 23.8 GHz,插入损耗为 51.9 dB,带宽为 1 122 MHz,延迟时间为 299 ns,直通抑制为 29 dB,3 次渡越抑制为 40 dB。

参考文献:

[1] 胡爱民,马晋毅. 微声电子器件—信息化武器装备的特种元件[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
 [2] DEFRANOULD P. Bulk acoustic microwave delay lines: design, fabrication and performance[J]. IEEE Proceedings, 1984, 131(4): 216-224.
 [3] REEDER T M, WINSLOW D K. Characteristics of microwave acoustic transducers for volume wave excitation [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1969, MTT-17(11): 927-941.
 [4] KO S H, LEE D, KANG H W, et al. Nanoforest of hydrothermally grown hierarchical ZnO nanowires for a high efficiency dye-sensitized solar cell[J]. Nano Letter, 2011, 11: 666-671.
 [5] FU Y Q, LUO J K, DU X Y, et al. Recent developments on ZnO films for acoustic wave based bio-sensing and microfluidic applications[J]. Sensors and Actuators B, 2010, 143: 606-619.