

GHz 频带声表面波谐振器的研究

范子坤¹, 葛惟昆²

(1. 航天二院二十三所, 北京 100854; 2. 香港科技大学物理系, 香港)

摘 要: 本文叙述了 GHz 频带声表面波谐振器的设计、制造和试验结果。对两种不同模式的声表面波谐振器进行了研究, 它们是瑞利波型谐振器和表面横波型谐振器。对两种波型谐振器的频率温度特性进行了比较。最后对表面横波 (STW) 谐振器在振荡器中的应用进行了研究。

关键词: 声表面波谐振器; 瑞利波; 表面横波

中图分类号: TN011. 4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 05-0908-04

Research on Gigahertz Range Surface Acoustic Wave Resonators

FAN Zi-kun¹, GE Wei-kun²

(1. Beijing Changfeng Surface Acoustic Wave Company, Beijing 100854, China;

2. Hong Kong University of Science and Technology, Department of physics, Hong Kong, China)

Abstract: The design, fabrication and test results of surface acoustic wave resonators in the GHz range are described. The two different modes of SAW resonators were investigated. They are the Rayleigh mode type resonators and surface transverse wave (STW) mode type resonators. Their frequency behavior with temperature were compared. At the end the applications of the STW resonators in oscillators were studied.

Key words: surface acoustic wave resonators; Rayleigh wave; surface transverse wave

1 引言

随着通信技术的发展, 对信号源的高频化、高准确度和高稳定度提出了越来越高的要求。信号源的设计一般是采用石英晶体谐振器在低频下产生振荡 (一般为几兆赫 ~ 几十兆赫), 然后采用倍频的办法形成高频信号, 这样作的优点是石英晶体谐振器的频率稳定度高, 缺点是线路复杂, 体积大, 成本高, 同时经过几次倍频之后, 相位噪声变大。采用声表面波谐振器可以直接在 GHz 频带产生振荡而形成高频信号, 无需倍频。这样简化了线路, 缩小了体积, 降低了成本, 减小了相位噪声, 同时提高了振荡器的可靠性。

由于上述原因, 在几百兆赫 ~ 2 千兆赫的频率范围之内, 采用声表面波谐振器作为频率控制元件得到较快的发展, 引起了电路工程师们的广泛关注。根据这一要求, 我们克服了材料、设计、微细加工工艺和测试方面的困难, 研制出了 GHz 频带的高 Q 值高精度声表面波谐振器, 并对其应用进行了初步研究。

2 基片材料的选取

声表面波器件的性能除了设计和工艺技术之外, 和基片材料的选取关系十分密切, 因此基片材料的选取, 包括单晶种类、切型、机电耦合系数、表面波传播速度、温度延时特性 (TCD) 等就显得十分重要。Li₂B₄O₇ 和石英是两种温度延时系

数很理想的材料, Li₂B₄O₇ 的机电耦合系数为石英的 5 ~ 6 倍, 是一种有发展前途的新型压电材料, 但是由于这种材料易溶于酸、水等液体, 增加了制作工艺的困难, 同时材料成本高, 限制了它的应用发展。另一种材料就是石英, 这种材料以良好的温度稳定性而被广泛地应用于对频率稳定性和准确度要求高的声表面波器件, 特别是声表面波谐振器。

从切型考虑, ST 石英 (45°Y-X) 应用广泛, 厂史长久, 试验数据充分, 工艺成熟。但这种切型的主要缺点是声表面波速度 V_s 低 (约 3150m/s), 这样对 GHz 频带的声表面波谐振器而言在微细加工工艺水平方面提出了很高的要求。

近年来出现了一种新切型 (36°Y-X) 的石英材料, 这种切型的材料, 沿垂直 X 轴方向传播的是表面横波 (STW), 其速度和 ST 石英表面传播的瑞利波相比提高很多 (约 5068m/s), 对于 GHz 频带声表面波谐振器就降低了制作工艺的难度。试验表明这种切型材料的温度延时系数优于 ST 石英, 而且这种波型属于浅体波, 抗表面干扰和耐功率特性都比较好。本课题分别采用这两种类型的材料设计和制作 GHz 频带的声表面波谐振器, 并通过测试进行了比较研究。

3 参数的设计

考虑到声表面波谐振器静态电容对振荡器的影响, 高频振荡器一般选用双端对谐振器作频率控制元件。双端对谐振器的结构是在反射栅形成的谐振腔内放置两个换能器, 一个

为输入换能器,一个为输出换能器.图 1 示出了双端对声表面波谐振器的结构示意图.从图 1 可以看出,表面横波谐振器与瑞利波谐振器相比,在二个换能器中间增加了中心反射栅,其目的是为了把表面横波束缚在表面,以减小向体内辐射造成的衰耗.



图 1 双端对声表面波谐振器结构示意图

反映声表面波谐振器电性能的最主要的参数是有载 Q 值(记为 Q_L)和无载 Q 值(记为 Q_U). Q_L 和 Q_U 的计算公式^[1]如下:

$$Q_L = f_0 / BW_3 \quad (1)$$

$$Q_U = Q_L / (1 + 10^{-L/20}) \quad (2)$$

式中 f_0 为谐振器中心频率, BW_3 为 3dB 带宽, L 为插入衰耗.

从公式(2)可以看出,插入衰耗 L 越小, Q_L 值越高, Q_U 值就越高.但插入衰耗和 Q_L 值有矛盾的一面,同时和寄生峰抑制也相互制约,因此需要折中考虑.我们通过对比试验优化设计参数,最后确定的主要设计参数如表 1 所示.

表 1 1.32GHz 声表面波谐振器主要设计参数

	表面横波型	瑞利波型
反射栅条数	500 根/每侧	800 根/每侧
换能器对数	75 对(输入输出)	60 对(输入输出)
孔径	50	80
换能器之间距离	12.625	6
中心反射栅条数	25 根	-

4 微细加工工艺技术

4.1 细线条光刻技术

声表面波谐振器反射栅和换能器的线条宽度 D 等于波长的四分之一.声表面波的波长和中心频率 f_0 及基片材料的声表面波速度 V_s 有如下关系:

$$D = V_s / f_0 \quad (3)$$

对于 ST 石英瑞利型声表面波而言 $V_s = 3150\text{m/s}$,当中心频率为 1.32GHz 时需要加工的最细线宽 $D = 0.59\mu\text{m}$,已经进入了深亚微米的领域,采用一般的接触式光刻工艺技术是很难完成的.目前解决这一问题的技术途径主要有三种,第一种是采用远紫外光缩小投影光刻技术,第二种是采用 X 线光刻技术,第三种是电子束直写技术.

航天二院二十三所声表公司和香港科技大学开展技术合作,采用电子束直写工艺技术最细线宽作到了 $0.5\mu\text{m}$,完成了 1.32GHz 和 1.45GHz 的声表面波谐振器的研制.

4.2 频率的精确控制

声表面波谐振器的制作工艺中频率的精确控制也是一个相当困难的问题,它不仅涉及到线条的微细加工,而且还对基

片材料的定向误差、金属膜厚度的控制、线宽的精确控制都提出了很高的要求,否则成品率非常低,甚至作不出合格的产品.我们采用了以下的措施来提高频率的控制准确度:

(1)对基片材料的定向误差严格控制,逐片检测使基片定向误差控制在 $\pm 1.5'$ 之内.

(2)解决超薄铝膜的淀积及膜的质量控制,使 700A 的铝膜均匀无针孔,片内及片间的均匀性小于等于 $\pm 3\%$.膜厚的控制精度小于等于 $\pm 25\text{\AA}$.

(3)对光刻工艺通过正交试验,优化工艺条件,使线宽控制精度达到 $\pm 10\%$.

采取上述措施之后,产品的成品率有了明显提高,表 2 给出了 5 只样品的测试结果.测试是采用专门设计制作的高频测试夹具,在 HP8753B 网络分析仪上进行的.

表 2 表面横波谐振器部分样品测试结果

序号	中心频率 MHz	插入衰耗 dB	有载 Q 值 (Q_L)	无载 Q 值 (Q_U)	寄生峰抑制 dB
1	1320.05	5.08	2842	6418	8.4
2	1320.10	5.30	2880	6306	8.3
3	1320.09	5.27	2895	6365	8.2
4	1320.39	6.05	3197	6368	10.0
5	1320.15	5.63	3384	7094	9.0

5 号样品的幅频特性曲线如图 2 所示.

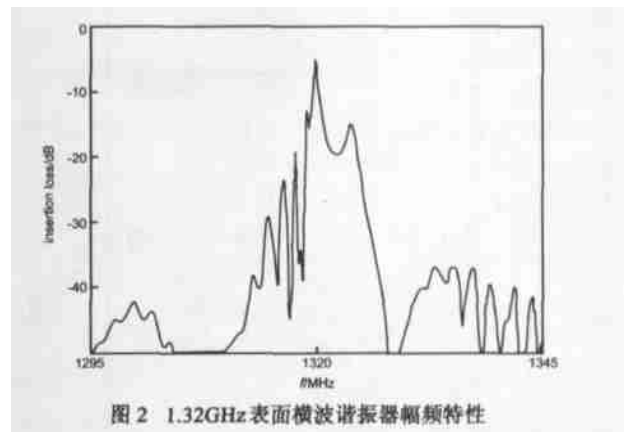


图 2 1.32GHz 表面横波谐振器幅频特性

样品芯片反射栅和换能器的显微照片如图 3 所示.

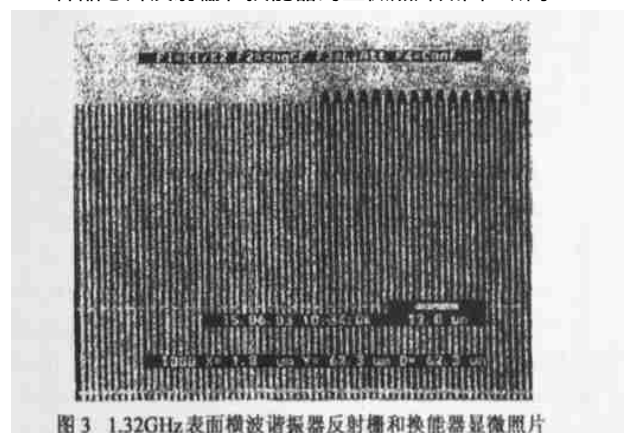


图 3 1.32GHz 表面横波谐振器反射栅和换能器显微照片

表 3 给出了近期国内外关于表面横波谐振器的部分研究结果.

表 3 近期国内外关于表面横波谐振器的部分研究结果

时间 (年)	中心频率 (GHz)	插入损耗 (dB)	Q_L	Q_U	寄生峰抑制 (dB)	作者
1987	1.74	10	—	5600	9.5	Bagweell T L, et al ^[2]
1995	2.0	10	—	3800	—	Ivan D. Avramov, et al ^[3]
1997	3.0	9.5	1680	2400	7	Enmanuel Bigler, et al ^[4]
2000	1.09	3	2457		7	周卫 ^[5]
2000	1.32	4~6	2800~3300	>6000	8~12	范子坤 ^[6]

5 声表面波谐振器频率温度特性的研究

声表面波谐振器的频率温度特性是至关重要的特性,因为它关系到应用于系统时信号源的频率的稳定性。为了比较表面横波声表面波谐振器和瑞利波声表面波谐振器的频率温度特性,分别在 -40 ~ 85 的范围内测试了两种样品的频率温度特性,测试结果如表 4 所示,其频率温度特性曲线如图 4 所示:

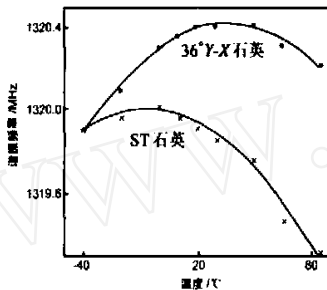


图 4 声表面波谐振器的频率温度特性

表 4 声表面波谐振器的频率温度特性

温度 (°C)	表面横波谐振器			瑞利波谐振器		
	f_0 (MHz)	I_L (dB)	Q_L	f_0 (MHz)	I_L (dB)	Q_L
-40	1319.900	4.72	2865	1319.900	8.76	2647
-20	1320.100	5.22	2977	1319.950	7.08	2605
0	1320.300	5.13	2957	1320.000	8.96	2645
10	1320.350	5.60	3073	1319.950	9.64	2724
20	1320.400	5.33	2974	1319.900	9.55	2668
30	1320.400	5.57	2960	1319.850	9.22	2668
50	1320.400	6.59	3080	1319.750	9.64	2662
65	1320.300	5.34	3134	1319.450	9.70	2565
85	1320.200	5.53	3098	1319.300	9.54	2552

从试验结果可以看出,采用 ST 石英做出的 1.32GHz 瑞利波谐振器其频率温度曲线的极大点 ($df/dT=0$) 温度在 0 附近,其频率温度系数的二次项 (d^2f/dT^2) 约为 0.018PPm/ 2 。而采用 36°Y-X 石英作出的 1.32GHz 表面横波谐振器,其频率温度曲线的极大点 ($df/dT=0$) 温度在 20 ~ 30 之间。其频率温度系数的二次项 (d^2f/dT^2) 约为 0.012 PPm/ 2 。比较而言采用 36°Y-X 石英作出的表面横波谐振器其频率温度特性更好一些。

6 声表面波谐振器的应用试验研究

为了考查声表面波谐振器在 GHz 频带的应用特性,我们采用 1.45GHz 的表面横波谐振器组装了一个点频振荡器,其全部电路封装在一个 32 × 13 × 9mm³ 的金属盒内。其线路原理图如图 5 所示。

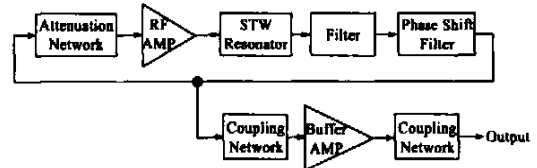


图 5 振荡器线路原理图

振荡器的输出频谱特性曲线如图 6 所示,其输出功率为 11.5dBm。振荡器的输出相噪特性曲线如图 7 所示,单边带相位噪声在偏离载频 10KC 处可达 -105dBc/Hz。较好的达到了设计要求。

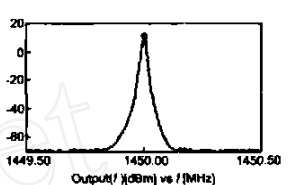


图 6 振荡器输出频谱特性

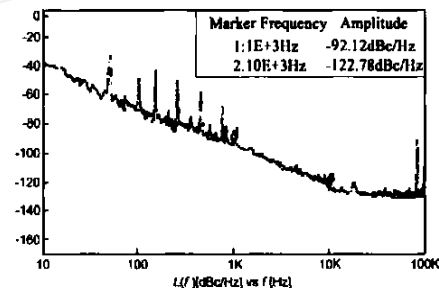


图 7 振荡器输出相噪特性

致谢 在谐振器和振荡器的试验研究中得到了航天二院二十三所刘亚宁、中国科学院电工研究所杨志山和香港科技大学微制做中心的大力协助,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] GB3145 - 99. 声表面波器件测试方法[S].
- [2] Bagweell T L, Bray R C. Novel surface transverse wave resonators with low loss high Q[A]. IEEE Proc. Ultrasonics Symposium[C]. October 14 - 16, Denver, Colorado USA, 1987. 319 - 324.
- [3] Ivan D Avramov, Vladimir S Aliev, Sergey Denissenko, Anatoliy S Kozlov. 2GHz surface transverse wave oscillators design, performance and limitations[A]. IEEE International Frequency Control Symposium[C]. 31May - 2June, San Francisco, California, USA, 1995. 459 - 468.
- [4] Emmanuel Bigler, Serguei Denissenko, Edmond Cambril. Design and test of 3GHz fundamental mode surface transverse wave resonators on quartz[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelec Freq Contr, 1997, 44(2): 399 - 404.
- [5] 范子坤. 1.32GHz 声表面波谐振器研制总结报告[R]. 北京: 航天二院 23 所, 2000.

[6] 周卫. 1GHz 声表面波谐振器的研究及应用[J]. 应用声学, 声表

面波谐振器研制, 2000, 19(1): 46 - 48.

作者简介:



范子坤 男, 1941 年 3 月生于河南省虞城县, 研究员, 全国频率选择与控制用压电器件标准化技术委员会委员, 中国电子学会高级会员, 1965 年 8 月毕业于北京大学物理专业, 1979 - 1981 年, 在日本东京大学工学电子工学科进修

集成电路制造技术, 1989 - 1991 年, 在香港华科电子公司从事电子束制版的研究, 1991 年至今, 在北京长峰声表面波公司从事声表面波器件的设计与制作技术的研究, 先后在 Applied Physics Letter, ACTA PHYSICA SINICA 等国内外杂志上发表论文数十篇. E-mail: fhy6990@hotmail.com.



葛惟昆 男, 1942 年生于北京, 1959 年毕业于北京四中, 1965 年毕业于北京大学物理系, 1983 年获英国曼彻斯特大学哲学博士学位, 1983 - 1984 年在该校作博士后, 1965 - 1978 年在北京有色金属研究所工作, 曾任研究室主任, 1984 - 1988 年在中国科学院半导体研究所工作, 曾任副所长, 1988 - 1993 年在美国达慕民学院任研究

副教授, 1993 年到香港科技大学任教, 现为物理系教授.

www.cnki.net