

# 声表面波谐振器型振荡器的研制

范东远 陈 明

(西北工业大学自动控制系, 西安·710072)

本文介绍了金属条反射栅双端对声表面波谐振器型的原理和结构特点,给出了一种采用声表面波谐振器稳频的低噪声、高稳定性的振荡器电路设计方案。对影响振荡器频率稳定度的因素进行了分析讨论,并探讨了改善声表面波振荡器频率稳定性的方法。该声表面波谐振器的中心频率为120MHz,无载 $Q_u$ 大于20,000,插入损耗小于6.0dB。经测试,秒级频率稳定度为 $10^{-10}$ 数量级,在自由室温下的日平均波动为 $10^{-6}/d$ 数量级。

关键词: 声表面波,谐振器,振荡器

## The study of surface acoustic wave resonator oscillator

FAN Dongyuan, CHEN Ming

(Northwestern Polytechnical University · Xian · 710072)

The operational principle and design of surface acoustic wave resonator oscillator are introduced in this paper. A low noise, high stable oscillator circuit is given. This paper also described the main factors that affect the frequency stability of the SAW oscillators, and investigated the ways of improving them. The 120MHz double-port SAW mass-loading stripes resonator made in our laboratory, for which the unloading quality factor  $Q_u > 20,000$ , and the insertion loss  $< 6.0\text{dB}$ , has been used as a frequency controlled element to construct an oscillator. The oscillator short term stability measured in 1 second is  $1 \times 10^{-10}$ , at room temperature, the average frequency fluctuation is  $1 \times 10^{-6}/d$ .

**Keywords:** surface acoustic wave, resonator, oscillator

### 1 前 言

声表面波(SAW)振荡器是利用声表面波谐振器或延迟线作为稳频元件而构成。声表面波器件通常采用性能稳定的单晶石英材料制作,输出的频率非常稳定。体声波(BAW)石英谐振器虽然有很高的 $Q$ 值,但有一个大约100MHz的上限频率。声表面波谐振器或延迟线的工作频率可以从几十MHz至2GHz,声表面波谐振器具有较高的 $Q$ 值和较低的插入损耗,适宜作稳定的固定

点频率源,声表面波延迟线则有较宽的调谐范围,可作压控频率源。

声表面波振荡器基频工作频率高,使用范围可高至2000MHz,与传统的采用较低频的体声波振荡器,然后进行倍频、滤波的系统相比较,具有重量轻、体积小、功耗减少、成本降低、可靠性增加等优点。

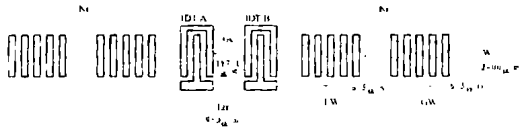
声表面波振荡器作为声表面波传感器的敏感元件,其频率稳定度直接影响着传感器的分辨率、稳定性和测试精度。因此声表面波振荡器频率稳定度的提高有助于进一步改进

\* 收稿日期:1996-6-11;修回日期:1996-11-25

传感器的性能指标。

## 2 声表面波金属条反射栅双端对谐振器

声表面波金属条反射栅双端对谐振器是由声反射器、SAW 谐振腔、能量耦合机构 3 个基本单元组成,如图 1(a)所示。图中各单元的具体作用如下:



(a) 双端对声表面波谐振器结构示意图

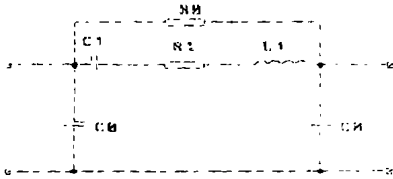


图 1 金属条反射栅双端对谐振器结构形式及等效电路

(1) 声反射器:作用是提供有效的声反馈,把能量限制在谐振腔内。由于大的阻抗变化会引起声表面波显著地转换成体声波等模式,因此声表面波反射器的特点是分布式的反射。即由若干个周期性的、声阻抗不连续的小条带组成一个分布式反射器。在采用金属条带反射栅的情况下,当条宽和间隔相等且都等于  $1/4$  波长时,就达到最大的相干反射。

(2) 声表面波谐振腔:是能量集中发生相干部分,它决定谐振响应的频率和共振波模之间的间隔。声表面波谐振腔是由适当设置的两个声表面波反射器构成的,实际上就是一个平面 Fabry-Perot 谐振腔,当金属叉指换能器(IDT)激发的声表面波向两边传播时,会遇到反射栅的反射。如果反射的声表面波与激发的声表面波同相位相加形成驻波,则在两个反射器之间就构成一个谐振腔。外

加电信号的频率与谐振腔同步,则产生共振。

(3) 能量耦合机构:是利用金属叉指换能器把电信号引入声表面波谐振系统并取出信号的机构。

声表面波谐振器的等效电路如图 1(b)所示。图中  $R_1$  为谐振时的损耗电阻,  $L_1$  和  $C_1$  分别表示谐振时的动态电感和电容,  $R_0$  是叉指换能器的辐射电阻,  $C_0$  为静态电容。典型的声表面波谐振器等效电路参数为:  $R_1$ :  $50 \sim 350 \Omega$ ;  $L_1$ :  $0.5 \sim 1.5 \text{mH}$ ;  $C_1$ :  $0.05 \sim 0.2 \text{pF}$ ;  $C_0$ :  $1.0 \sim 3.0 \text{pF}$

金属条反射栅谐振器的  $Q$  值虽然不如沟槽反射栅谐振器的  $Q$  值高,但制作工艺较简单,可以利用比较成熟的半导体平面工艺在抛光晶片上一次光刻制成,无需其他复杂和昂贵的设备及工艺,同时考虑到器件实际使用中的温度稳定性问题,我们以 ST-X 石英为基片,制作了金属条反射栅双端对 SAW 谐振器,主要设计参数为:中心频率  $f_0$ :  $120 \text{kHz}$ ;叉指换能器  $A$ : 40 对;叉指换能器  $B$ : 40 对;反射单元数  $N_r$ : 500 根;反射栅间隔  $GW$ :  $6.5 \mu\text{m}$ ;线宽  $L_w$ :  $6.5 \mu\text{m}$ ;声孔经  $W$ :  $2400 \mu\text{m}$ ;腔长  $L_r$ :  $1950 \mu\text{m}$ ;两换能器之间的距离  $Gc$ :  $187.1 \mu\text{m}$

用 HP8752A 矢量网络分析仪,对制作的 4 只声表面波谐振器进行了测试,其中心频率均在  $120.907 \sim 120.967 \text{MHz}$  内,无载  $Q_u$  大于 20,000,插入损耗小于  $6.0 \text{dB}$ 。

## 3 低噪声高稳定性振荡器电路

我们采用图 2 正弦波串联式 SAW 谐振器型振荡器电路,其中第 1 级是主振级,第 2 级为发射极跟随器,电容  $C_1 \gg C_3$ ,  $C_2 \gg C_3$ ,  $C_3$  为可变电容,  $C_B$  为基极耦合电容。

该电路与电容三端式克拉泼电路相似,正反馈信号经过 SAW 谐振器接到晶体管的基极和地之间,调谐振荡器回路,使其振荡频率等于声表面波谐振器的谐振频率时,声表面波谐振器就呈现数值不大的电阻。此时反

馈最强,故满足振荡条件。对于其它频率,声表面波谐振器不会发生谐振,它在反馈回路中呈现一个较大的电阻,使电路难以满足振荡条件。因此,电路的振荡频率以及频率稳定度,均由声表面波谐振器的性能决定。

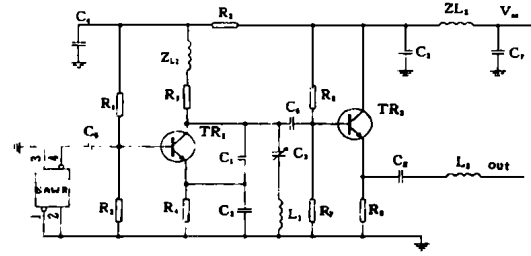


图2 SAW谐振器型振荡电路原理图

该电路为共基极电路,起振条件为:

$$h_{fe} > \frac{C_2 h_{ie}}{C_1 P_{ce}^2 R_p} > \frac{h_{ie}}{h_{fe} P_{ce}^2 R_p} \quad (1)$$

式中,  $P_{ce}$  为晶体管  $TR_1$  的集电极回路接入系数,  $R_p$  为输出回路的谐振阻抗,  $h_{fe}$  为晶体管  $TR_1$  的电流放大倍数,  $h_{ie}$  为晶体管  $TR_1$  的输入电阻。

频率稳定度是 SAW 振荡器的重要技术指标,它包括短期频率稳定度,主要由噪声决定;中期频率稳定度,主要与环境温度、电源及负载等变化有关;长期频率稳定度,主要由器件的老化特性决定。对于 SAW 谐振式振荡器,双边带相位噪声/载波比  $S_d(f)$  可以近似表示为:<sup>[11]</sup>

$$S_d(f) = [\alpha_e f_0^4 + \alpha_e \{f_0 / (2Q_L)\}^2] / f^3 + [(2GFKT/P_0) \{f_0 / (2Q_L)\}^2] / f^2 + (2\alpha_e Q_L f_0^4) / f^2 + 2GFKT / P_0 \quad (2)$$

式中,  $G$ : 晶体管功率增益;  $F$ : 晶体管噪声系数;  $T$ : 绝对温度;  $P_0$ : 载波功率;  $f_0$ : 载波频率;  $f$ : 偏离载波频率;  $Q_L$ : 声表面波谐振器的负载品质因数;  $\alpha_R$ : 声表面波谐振器的闪烁噪声常数;

上述公式基本上描述了振荡器的噪声谱特性,等式右边所列4项:第1项是与  $f^3$  有关的闪烁噪声调频贡献,第2项是与  $f^2$  有关的白噪声调频贡献,第3项对于在 100MHz

以上基频工作的 SAW 谐振器振荡器可以忽略,第4项是与频率无关的白噪声调相。

(2)式表明,为了降低振荡器的本底噪声,应增大振荡器的载波功率,减小放大器的压缩功率增益( $G$ )和噪声系数( $F$ ),同时,应尽可能提高声表面波谐振器的负载  $Q_L$ 。

本电路中,选用高频低噪声晶体管 2SC3358 作有源器件,本身的噪声系数  $N_F < 1.1$ 。由于晶体管的参数受环境温度、电源电压等的影响较大,特别是结电容,一般随电压增加电容量减小。为了减小晶体管输入输出电容的变化对振荡频率的影响,晶体管极间并联了较大的电容  $C_1$ 、 $C_2$ ,以便减弱晶体管与振荡回路之间的耦合。由于电路元件选择  $C_1 \gg C_3$ 、 $C_2 \gg C_3$ ,因此调谐回路的中心频率基本由  $C_3$  和  $L_1$  决定,而反馈系数仅决定于  $C_1$  与  $C_2$  的比值。

除此之外,选用优质回路元件,稳压电源,并尽量消除外界干扰等措施,也有助于提高振荡器频率稳定度。

## 4 振荡器性能测试结果与讨论

### 4.1 振荡器短期频率稳定度及相位噪声测量

采用 HP5390A 频率稳定度分析仪,以 HP8662A 频率综合信号发生器作参考源,对振荡器的短期频率稳定度及相位噪声特性进行了测量,测试框图如图3所示。

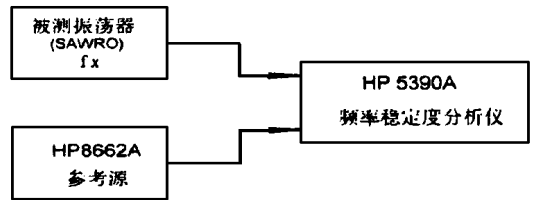


图3 振荡器短期频率稳定度测试框图

在不同取样时间测得振荡器的短期频率稳定度为: 1ms 为  $2.449E-10$ , 10ms 为  $2.662E-10$ , 0.1s 为  $1.347E-10$ , 1s 为  $1.956E-10$ , 10s 为  $1.188E-10$ , 取样时间由

0.001s 至 10s 范围内, 振荡器的频率稳定度都处在  $10^{-10}$  数量级, 如图 4 所示。

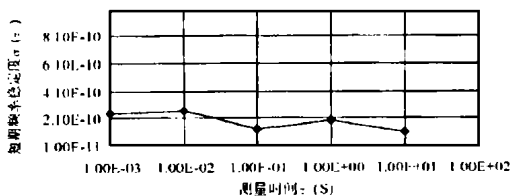


图 4 120MHz 金属条反射栅 SAW 谐振器的短期频率稳定度曲线

振荡器的相位噪声特性测试结果为: 在偏离振荡器输出信号载频中心 1Hz 处是 -37.5dBC/Hz, 10Hz 是 -48.3dBC/Hz, 100Hz 是 -65.5dBC/Hz, 1kHz 是 -108dBC/Hz, 10kHz 是 -117.0dBC, 如图 5。

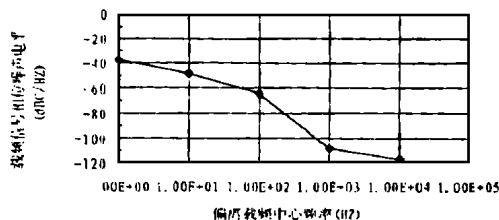


图 5 120MHz 金属条反射栅 SAW 谐振器的相位噪声曲线

#### 4.2 振荡器的中期频率稳定度

我们对振荡器的日频率波动指标进行了测量, 在自由室温下, 每天的平均波动为 2.1PPM/d, 频率变化主要由昼夜温度变化引起。还利用 SAW 金属条反射栅双端对谐振器作为稳频元件, 采用类似电容三端式克拉泼电路, 组成了稳定的声表面波振荡器, 短期频率稳定度处在  $10^{-10}$  量级范围, 它可广泛应用于无线电通讯、卫星导航、导弹制导和遥测、遥控等设备上。

可以相信, 随着材料、工艺、结构等方面的进展, 声表面波振荡器必将有更大的发展。

#### 参考文献

- 1 T. E. Paker and G. K. Montress. Precision surfac-acoustic-wave (SAW) oscillators. IEEE Transactions On Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1988; 35(3): 342~360.
- 2 G. K. Montress, T. E. Paker and M. J. Lodboda. Extremely low phase noise SAW oscillator design and performance. in Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium, 1987; 47~52.
- 3 D. T. Bell and R. C. M. Li. Surface-acoustic-wave resonators. in Proceedings of the IEEE, 1976; 64(5): 711~721.

## 上海市声学学会代表团访问江苏省

上海市声学学会代表团一行 10 人受江苏省声学学会环境声学专业委员会和江苏省环境科学学会环境噪声与振动专业委员会邀请, 于 1997 年 5 月 7 日至 9 日赴江苏省进行了参观访问, 这是国内省市地方学会之间开展学术活动的一种新形式。上海市声学学会代表团由王季卿和章奎生两位教授带队, 在江苏省声学学会理事长吴文虬教授以及柳孝图教授和孙广荣教授的陪同下, 先后参观访问了常州市红梅西村住宅小区对铁路噪声的防治措施和亚西亚影城, 南京梅花山国际会议中心, 东南大学礼堂改建工程, 南京五台山游泳馆, 江苏省大剧院模型等, 还参观了南京陶华新型建筑材料公司。通过两地学者的交流座谈, 沟通信息、交流了噪声控制和建筑声学领域的最新成果, 尤其是在厅堂音质设计和新材料新结构应用方面的新进展, 互有启发。同时企业界代表——上海申华声学装备有限公司、江苏无锡堰桥噪声控制设备厂、上海松江橡胶制品厂、南京陶华新型建筑材料公司的厂长经理们也参加了交流座谈。

吕玉恒