

第三届全国高稳晶 振技术交流会论文集

内 部 发 行



中国测试学会时间频率专业高稳晶振委员会

第三届全国高稳晶振技术

交流会论文集

中国计量测试学会时间频率专业高稳晶振委员会

一九八四年十月

桂 林

前 言

在中国计量测试学会时间频率专业高稳晶振委员会〔(简称GJ委员会)原高稳晶振常设领导小组〕的组织领导下,第三届全国高稳晶振比对测试工作于1984年4月~5月在中国计量科学研究院进行,此项工作由中国计量科学研究院和总参57所共同承担。并于同年11月在桂林由总参57所主办召开了第三届全国高稳晶振技术交流会,来自全国有关研究院、所、大学、部队、工厂等39个单位84名代表参加了会议,本次会议共收到论文45篇,大会交流13篇,分组交流27篇。会议对晶振老化率进入 10^{-12} ,秒稳进入 10^{-13} 以及各类晶振达到国内外先进水平的14个单位颁发了奖状、证书。在整个技术交流会期间、与会代表对现代晶振基础理论、设计、制作、测量及发展方向展开了认真、热烈、深入的讨论。决心为把我国高稳晶振技术全面推向世界先进水平而努力工作。

会议考虑到,为适应我国经济体制改革的需要和领导成员工作的变迁,经研究决定,高稳晶振专业委员会由下列同志组成:

主任委员:李达权,

付主任委员:杨易旻 陈志远

委员:张力生 卢平安 程天军 曹 晖 赵声衡 罗华浩 黄兴宁

秘书长:张力生

本《论文集》收录了水平较高而又有代表性的论文36篇,并附有首届、二届、三届全国高稳晶振比对测试结果一览表,全集约30万字。内容丰富,技术新颖,对从事时间频率控制专业的研制、生产、计量、使用、维修人员和管理干部,以及从事宇航,通讯、雷达、遥测、遥控、遥感等专业的同志都有较高的参考价值。还可以作为大专院校有关专业师生的参考资料。

中国人民解放军总参第五十七研究所的同志们为该《论文集》的出版做了许多具体的工作,在此特向为该《论文集》作出贡献的有关单位和编辑部的全体同志表示衷心的感谢!

由于编者水平所限,加之时间又紧,文中定有不妥之处,请读者指正。

中国计量测试学会时间频率专业高稳晶振委员会

一九八五年一月

目 录

(981) 李国良	综 述	我国高稳晶振研制工作的进展	卢平安 (1)
-----------	-----	---------------	---------

石英谐振器

SC切石英谐振器	罗福臻	(11)
基频700~1000MHz体波石英谐振器及 特高频高稳定晶振的展望	雷震寰 迟洪广 王宜华	(17)
SC切石英片切角的计算和定向	黄泗来 袁 斌	(21)
100MHz精密低噪声石英谐振器的设计	徐中梅	(25)
晶振设计、制作和电路分析		
SC切5MHz晶体振荡电路的研制	单涨国	(31)
高稳晶振短期稳定度的改善	周贤安	(34)
一种小型双层直流温控5MHz晶体振荡器	穆学孟	(37)
放大器相位噪声的优化设计	冯金梅 余道衡 胡庆军	(41)
频率带尾数的高稳定晶体振荡器	徐天瑞	(48)
高稳晶振老化率的机理	管文彬	(50)
提高EE1610型高稳石英晶体振荡器短稳的措施	黄兴宁	(63)
10MHz高稳晶振的研制	陆保国	(70)
单层高稳定10MHz晶体振荡器	郑筱霞	(77)
超小型恒温晶振的设计和性能	赵声衡 黄深明	(85)
一种适用于晶体振荡器的半导体集成电路	黄深明	(90)
微波晶体振荡器设计与实践	李全海	(95)
100MHz晶体振荡器	王俊岭	(104)
BUDXO基波特高频直振式石英晶体振荡器的分析与实现	苏秀臣 曹 晖 程天军	(109)
100MHz晶振的噪声分析及瞬稳估算	吕景仰	(116)
低噪声高频晶体振荡器的设计及指标估算	陈皖蜀	(123)
尾数不为零的超高频高稳定低噪声晶振的设计	张 华	(132)
核辐射对晶振频率稳定度的影响	陈志远	(137)
高稳定SC切晶体振荡器及其老化特性	张力生	(144)

恒温技术

晶振恒温电路灵敏性的表征和测量	周连亨	(149)
反加温原理及其防止方法	荣惠祖	(153)
PTC材料在振荡器中的应用	倪国良	(158)

温补晶振

TCXO中温补网络的计算机设计	徐泽雨	(161)
泛音晶体振荡器的温度补偿	赵国臣	(168)
电阻网络温度补偿石英晶体振荡器	程天军	(178)
(18) 郑 来 明 黄		
(22) 谢 中 强		

测量技术

晶振频率老化指标的评定	肖明耀	(189)
精密晶体振荡器时域噪声模型的测量与分析	胡锦涛	(194)
Po-7频标比对器的改进及测量结果	姚树伟	(201)
阿仑方差和相位噪声间的工程转换	曹 晖	(205)
晶体振荡器频率实时预报方法	胡锦涛 黄佩诚	(215)
频率稳定度的自动测试	曹 晖	(226)

附录

首届、二届、三届全国高稳晶振比对测试结果一览表		(236)
-------------------------	--	-------

(81) 曹 晖		
(82) 曹 晖		
(83) 曹 晖		
(84) 曹 晖		
(85) 曹 晖		
(86) 曹 晖		
(87) 曹 晖		
(88) 曹 晖		
(89) 曹 晖		
(90) 曹 晖		
(91) 曹 晖		
(92) 曹 晖		
(93) 曹 晖		
(94) 曹 晖		
(95) 曹 晖		
(96) 曹 晖		
(97) 曹 晖		
(98) 曹 晖		
(99) 曹 晖		
(100) 曹 晖		
(101) 曹 晖		
(102) 曹 晖		
(103) 曹 晖		
(104) 曹 晖		
(105) 曹 晖		
(106) 曹 晖		
(107) 曹 晖		
(108) 曹 晖		
(109) 曹 晖		
(110) 曹 晖		
(111) 曹 晖		
(112) 曹 晖		
(113) 曹 晖		
(114) 曹 晖		
(115) 曹 晖		
(116) 曹 晖		
(117) 曹 晖		
(118) 曹 晖		
(119) 曹 晖		
(120) 曹 晖		
(121) 曹 晖		
(122) 曹 晖		
(123) 曹 晖		
(124) 曹 晖		
(125) 曹 晖		
(126) 曹 晖		
(127) 曹 晖		
(128) 曹 晖		
(129) 曹 晖		
(130) 曹 晖		
(131) 曹 晖		
(132) 曹 晖		
(133) 曹 晖		
(134) 曹 晖		
(135) 曹 晖		
(136) 曹 晖		
(137) 曹 晖		
(138) 曹 晖		
(139) 曹 晖		
(140) 曹 晖		
(141) 曹 晖		
(142) 曹 晖		
(143) 曹 晖		
(144) 曹 晖		
(145) 曹 晖		
(146) 曹 晖		
(147) 曹 晖		
(148) 曹 晖		
(149) 曹 晖		
(150) 曹 晖		
(151) 曹 晖		
(152) 曹 晖		
(153) 曹 晖		
(154) 曹 晖		
(155) 曹 晖		
(156) 曹 晖		
(157) 曹 晖		
(158) 曹 晖		
(159) 曹 晖		
(160) 曹 晖		
(161) 曹 晖		
(162) 曹 晖		
(163) 曹 晖		
(164) 曹 晖		
(165) 曹 晖		
(166) 曹 晖		
(167) 曹 晖		
(168) 曹 晖		
(169) 曹 晖		
(170) 曹 晖		
(171) 曹 晖		
(172) 曹 晖		
(173) 曹 晖		
(174) 曹 晖		
(175) 曹 晖		
(176) 曹 晖		
(177) 曹 晖		
(178) 曹 晖		
(179) 曹 晖		
(180) 曹 晖		
(181) 曹 晖		
(182) 曹 晖		
(183) 曹 晖		
(184) 曹 晖		
(185) 曹 晖		
(186) 曹 晖		
(187) 曹 晖		
(188) 曹 晖		
(189) 曹 晖		
(190) 曹 晖		
(191) 曹 晖		
(192) 曹 晖		
(193) 曹 晖		
(194) 曹 晖		
(195) 曹 晖		
(196) 曹 晖		
(197) 曹 晖		
(198) 曹 晖		
(199) 曹 晖		
(200) 曹 晖		

我国高稳晶振研制工作的进展

一、三届全国高稳晶振比对测试综述

电子工业部第五十四研究所 卢平安

一、全国高稳晶振比对测试与技术交流会情况介绍

第一届全国高稳晶振比对测试工作于1979年10月在原七机部二院计量站举行, 21个单位的53台高稳晶振参加比对测试, 频率点为1 MHz、2.5 MHz、5 MHz、100 MHz四种。1979年12月, 在四川成都由原1010所主办召开了首届技术交流会, 会后由原七机部二院计量站出版了《高稳晶振技术交流资料汇编》。

在这次技术交流会上推荐产生了“全国高稳晶振比对测试与技术交流会”常设领导小组, 并确定以后每两年进行一次全国比对。

第二届全国高稳晶振比对测试工作于1981年10月仍在原七机部二院计量站进行, 24个单位的66台高稳晶振参加比对测试, 频率点有2.5 MHz、5 MHz、10 MHz、100 MHz四种, 并有三台外国晶振在相同条件下参加比对。

第二届技术交流会由计量站主办于1981年12月在四川青神867厂召开, 与会代表民主选举产生了新的领导小组, 并增选总参57所、湖南大学进入领导小组。会后由总参第五十七研究所出版了《全国第二届高稳晶振技术交流专辑》。

第三届全国高稳晶振比对测试工作于1984年4月至5月, 在北京中国计量科学研究院进行, 共有16个单位77台晶振参加了比对测试; 第三届技术交流会由总参57所主办, 于1984年11月在广西桂林召开, 会后仍由总参第五十七研究所出版《第三届全国高稳晶振技术交流会论文集》, 即本集。

实践证明, 先搞比对测试, 后搞技术交流, 再搞资料汇编的这种好形式, 深受国内同行的欢迎。正是由于这些有益的活动, 大大促进了我国高稳晶振研制工作的进展, 比对测试结果令人信服地说明: 经过全国同行这几年的努力, 高稳晶振研制水平已可进入世界先进行列比美。

二、三届全国高稳晶振比对测试的指标分析

1、老化率的重要突破

人们常用老化率来衡量高稳晶振的长稳水平, 表1给出了第一届、第二届、第三届全国高稳晶振比对测试的结果:

表1 老化率的进展数据表

届	2.5MHz	5 MHz (单)	5 MHz (双)	100MHz (双)	100MHz (单)
1	$4.6 \times 10^{-11}/\text{日}$	$7 \times 10^{-11}/\text{日}$	$3.1 \times 10^{-11}/\text{日}$		$6.9 \times 10^{-9}/\text{日}$
2	$1.8 \times 10^{-11}/\text{日}$	$2.3 \times 10^{-11}/\text{日}$	$9.99 \times 10^{-12}/\text{日}$	$3.5 \times 10^{-11}/\text{日}$	$9.3 \times 10^{-10}/\text{日}$
3	$5.7 \times 10^{-12}/\text{日}$	$1.8 \times 10^{-11}/\text{日}$	$8.55 \times 10^{-12}/\text{日}$	$1.2 \times 10^{-11}/\text{日}$	$8.65 \times 10^{-9}/\text{日}$

老化率的重要突破表现在进入了 10^{-12} 量级。在第二届比对中, 只有5 MHz双层达到了 9.99×10^{-12} , 而在第三届比对中, 有三台进入了 10^{-12} 量级, 它们是53号(2.5MHz压控10MHz): $5.7 \times 10^{-12}/\text{日}$, 54号(2.5MHz压控10MHz): $8.28 \times 10^{-12}/\text{日}$, 18号(5 MHz双层): $8.55 \times 10^{-12}/\text{日}$ 。

重要突破还表现在: 就最好指标来说, 在所有的频率点上, 老化率的指标第二届比第一届好, 第三届比第二届好。

从表1还可看出: 在前两届, 5 MHz双层的老化率优于2.5MHz的老化率, 而在第三届中, 2.5MHz的老化率又优于5 MHz的老化率。

2、秒稳进入 10^{-13} 量级

在第三届比对中, 秒稳进入 10^{-13} 量级的有三台, 即: 4号: $5.7 \times 10^{-13}/\text{S}$; 29号: $6.1 \times 10^{-13}/\text{S}$; 13号: $8.4 \times 10^{-13}/\text{S}$ 。三者都是5 MHz双层晶振。虽然说, 在第二届高稳晶振比对中, 5 MHz双层晶振也进入了 10^{-13} 量级, 但都是大系数的, 而在第三届比对中, 系数变小了。

由于短稳有随机性, 就秒稳而言, 并不都是一届比一届好, 但对5 MHz单层, 5 MHz双层和100MHz单层这三种类型的晶振来说是符合一届比一届好的规律的, 详见表2。

表2 秒稳的进展数据表

届	5 MHz单层	5 MHz双层	100MHz单层
1	$2 \times 10^{-12}/\text{S}$	$1.5 \times 10^{-12}/\text{S}$	$2 \times 10^{-11}/\text{S}$
2	$1.7 \times 10^{-12}/\text{S}$	$9.5 \times 10^{-13}/\text{S}$	$1.4 \times 10^{-11}/\text{S}$
3	$1.5 \times 10^{-12}/\text{S}$	$5.7 \times 10^{-13}/\text{S}$	$6.7 \times 10^{-12}/\text{S}$

3、日波动的进步

日波动这一指标, 有些厂家很重视, 因为它很实用。它是每隔1小时或两小时测一点, 用峰——峰值计算。

表3给出了5 MHz单层、5 MHz双层和100MHz单层的日波动情况。

表3 日波动的进步数据表

届	5 MHz 单层	5 MHz 双层	100 MHz 单层
1	1.3×10^{-10} / 日	1.8×10^{-10} / 日	1.2×10^{-8} / 日
2	7.3×10^{-11} / 日	2.1×10^{-11} / 日	6.6×10^{-9} / 日
3	2.3×10^{-11} / 日	2.65×10^{-11} / 日	2.5×10^{-9} / 日

由表可见, 5 MHz单层、100 MHz单层是一届比一届好, 5 MHz 双层在第三届比
 对中略有退步。

4、时域稳定度的进展

我们曾用“四系数之和”来表征时域稳定度的优劣。即把1 ms、10 ms、100 ms,
 和1 S四个取样时间, 分别用 10^{-9} 、 10^{-10} 、 10^{-11} 和 10^{-12} 标定。如果所测的指标刚
 好在规定的量级内, 所得的系数就是1~9 (有小数); 优于规定的量级, 所得的系数
 就是小于1的数; 劣于规定的量级, 所得的系数就是两位数字以上的数。当然就每一个
 取样的时间而言, 系数越小越好。将这四个系数相加, 即是“四系数之和”, 小者为
 优。作为例子, 我们把三届比对中5 MHz单层、5 MHz双层四个取样时间的系数 (取
 最佳数值) 列于表4。

表4 时域稳定度系数表

系 数 届	类 型 取 样 时 间	5 MHz 单层				5 MHz 双层			
		1 ms	10 ms	100 ms	1 s	1 ms	10 ms	100 ms	1 s
		10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}
1		0.89	0.81	0.91	2.5	0.84	0.5	0.32	1.5
2		0.62	1.4	1.3	1.7	0.56	0.57	0.88	0.95
3		0.1	0.2	0.4	1.54	0.25	0.36	0.39	0.57

“四系数之和”的典型数据列于表5。

表5 时域稳定度四系数之和表

届	5 zHM 单层	5 MHz 双层
1	5.11 (61号)	3.16 (22号)
2	5.02 (8号)	2.96 (1号)
3	2.69 (26号)	2.11 (29号)

从表4与表5明显地看出5 MHz单层、5 MHz双层晶振时域稳定度的进步, 第二

届比第一届好，第三届有较大的进步。

5、频域稳定度的进展

我们用“四负dB数之和”来表征频域稳定度的优劣。在测量时，选取偏离载频10Hz、100Hz、1KHz和10KHz四点，每一点可测得相对于载频负的dB数，显然负的数字越大越好。作为例子，我们把三届比对中5MHz单层、5MHz双层晶振所测得的四点dB数列于表6。

表6 频域稳定度dB数据表

类 型 测 试 点	5 MHz 单层				5 MHz 双层			
	10Hz (dB)	100Hz (dB)	1KHz (dB)	10KHz (dB)	10Hz (dB)	100Hz (dB)	1KHz (dB)	10KHz (dB)
1	-107	-107	-135	-140	-119	-115	-136	-136
2	-112.5	-120.5	-131	-133.5	-118.5	-132.5	-139.5	-142.5
3	-122.5	-140.7	-152.4	-158.8	-121.1	-135.9	-148	-157

四负dB数之和的典型数据列于表7。由表6、表7可见，一届比一届进步，第三届有较大的进展。例如5MHz单层晶振，第三届比第二届提高69.35dB，5MHz双层晶振，第三届比第二届提高25.5dB。

表7 频域稳定度四dB之和表

届	5 MHz 单层	5 MHz 双层
1	-489dB (37号)	-506dB (23号)
2	-502dB (8号)	-533dB (21号)
3	-571.85dB (26号)	-558.5dB (37号)

6、频率重复性的好较

因为频率重复性带有随机性，在这三届比中，没有表现出一届比一届好。较好的指标在 10^{-10} 、 10^{-11} 量级。表8给出了5MHz单层、5MHz双层的频率重复性数据。较差的指标在 10^{-9} 量级，有的达到 10^{-8} 量级。

表8 频率重复性数据表

届	5 MHz 单层	5 MHz 双层
1	1.1×10^{-10} (4号)	5×10^{-11} (6号)
2	2.4×10^{-10} (27号)	2.7×10^{-11} (28号)
3	8×10^{-11} (43号)	9.1×10^{-11} (15号)

7、负载特性的比较

负载特性同样带有随机性，也没有表现出一届比一届好。较差的在 10^{-8} 量级，较好的可达 10^{-13} 量级或更好。表9给出5MHz单层、5MHz双层和100MHz单层的负载特性数据。

表9 负载特性数据表

届	5 MHz 单层	5 MHz 双层	100MHz单层
1	1.7×10^{-12}	1.7×10^{-12}	3.3×10^{-8}
2	3×10^{-10}	4×10^{-12}	2.2×10^{-10}
3	6.7×10^{-13}	9.7×10^{-11}	1.7×10^{-9}

8、谐波抑制

这一指标由频谱仪测出二次、三次、四次、五次谐波的dB数（负值）。负的值越大越好。表10给出5MHz单层、5MHz双层和100MHz单层的数据。

表10 谐波抑制数据表

届	频率 谐波	5 MHz 单层				5 MHz 双层				100MHz 单层			
		2f ₀ (dB)	3f ₀ (dB)	4f ₀ (dB)	5f ₀ (dB)	2f ₀ (dB)	3f ₀ (dB)	4f ₀ (dB)	5f ₀ (dB)	2f ₀ (dB)	3f ₀ (dB)	4f ₀ (dB)	5f ₀ (dB)
1		-68	-62	-75	-75	-55	-75	-75	-75	-42	-52	-56	-75
2		-62	-56	-66	-69	-59	-65	-68	-70	-35	-51	-50	-64
3		-63	-61	-78	-77	-56	-69	-79	-77	-50	-57	-61	-64

9、非谐波抑制

在第三届比对测试中，对非谐波抑制作了测试。其中5MHz单层的最好指标是-79.8dB；5MHz双层的最好指标是-80dB；10MHz单层的最好指标是-77.4dB；10MHz双层的最好指标是-79.2dB；100MHz单层的最好指标是68.7dB；100MHz双层的最好指标是60.5dB。

10、体积

第三届比对测试中对体积提出了要求，在其它指标相同的情况下，体积小者为优。分立元件体积情况如表11所示。

表11 分立元件体积情况表

晶振类型	体 积
5 MHz 单 层	220 cm ³
5 MHz 双 层	576 cm ³
10MHz 单 层	175 cm ³
10MHz 双 层	576 cm ³
100MHz 单 层	108 cm ³
100MHz 双 层	385 cm ³

11、与外国晶振的比较

第一届比对, 没有和国外晶振一起比, 第二届比对, 有3台外国晶振一起参加比对, 但选用的几台外国晶振, 年代已久, 有的指标较差, 说明不了什么问题; 第三 届比 对时, 选用了三台指标比较优秀的外国晶振, 它们是: 西德的XSD—2、美国的8601—1、8601—3。因为它们都是5 MHz单层, 与这届比对荣获5 MHz单层总分第一名的 26号正好可以相比。具体指标见表12。

表12 与外国晶振比较表

晶 振	26 号	XSD—2	8601—1	8601—3
项				
老 化 率	$2.0 \times 10^{-11}/\text{日}$	$1.0 \times 10^{-10}/\text{日}$	$1.25 \times 10^{-11}/\text{日}$	$6.5 \times 10^{-12}/\text{日}$
日 波 动	$2.3 \times 10^{-11}/\text{日}$	$1.1 \times 10^{-10}/\text{日}$	$1.4 \times 10^{-10}/\text{日}$	$1.6 \times 10^{-11}/\text{日}$
时 域 稳 定 度	1 ms	0.1×10^{-9}	0.31×10^{-9}	0.45×10^{-9}
	10ms	0.2×10^{-10}	0.45×10^{-10}	1.22×10^{-10}
	100ms	0.32×10^{-11}	0.44×10^{-11}	0.55×10^{-11}
	1 s	1.56×10^{-12}	1.57×10^{-12}	1.72×10^{-12}
频 域 稳 定 度	10Hz	-122.5db	-116.8db	-104.8db
	100Hz	-140.7db	-128.3db	-125.3db
	1 KHz	-152.4db	-138.9db	-138.8db
	10KHz	-158.8db	-147.9db	-150.1db

谐波抑制	$2f_0$	-27.3db	-41.3db	-43.8db	-59.8db
	$3f_0$	-34.8db	-63.6db	-63.5db	-67.7db
	$4f_0$	-58.2db	-72.4db	-73.5db	-75.3db
	$5f_0$	-65.9db	-66.9db	-75.7db	-75.2db
非谐波抑制		<-78.4db	<-76.2db	<-74.8db	<-75.8db

由表12可见，我国研制的高水平晶振已进入了世界先进水平。

三、第三届全国高稳晶振比对测试的特点

1、大多数晶振都有进步

由上面的讨论，我们可以清楚地看到：就各单项指标而言，都有较大的进步。是不是只是个别的晶振指标比较突出，其它晶振都一般呢？不是的。从进入某一量级的晶振台数相对于参加比对晶振台数的比例的增加，令人信服地说明了不仅仅是一两台“尖子晶振”，不单单是一两个研制、生产单位，而是大多数晶振，大多数研制、生产单位都有程度不同的提高。表13、表14说明了这一问题。

表13 老化率的进步表

届	参加比对台数	进入 10^{-11} 量级台数	优于 2×10^{-11} 台数	进入 10^{-12} 量级台数
1	44	7	0	0
2	56	26	6	1
3	51	29	8	3

表14 秒稳的进步表

届	参加比对台数	进入 10^{-12} 量级台数	优于 2×10^{-12} 台数	进入 10^{-13} 台数
1	44	6	3	0
2	56	36	6	1
3	51	45	8	3

2、品种齐全，类型多样

表15给出第一届、第二届、第三届全国晶振比对类型分布情况表。

表15 一、二、三届全国晶振比对类型表

届	台数 频率 类型	1 MHz	2.5 MHz	5 MHz	10 MHz	100 MHz	30~500 MHz	600~1000 MHz	>1000 MHz
1	单层恒温	2	2	16		3			
	双层恒温		3	26		1			
2	单层恒温			14		2			
	双层恒温		10	30	2	3			
	国外晶振			3					
3	单层恒温		2	19	6	4	2	4	2
	双层恒温			20	1	1	1		
	无恒温						7	1	3
	温补					1			
	国外晶振			3					

由表可见，第三届全国晶振比对的类型比一、二届有很大的进展，工作频率向高端扩展。恒温晶振的品种也比较齐全，5 MHz单层、双层，10 MHz单层、双层，100 MHz单层、双层都有。

第三届比对有19台新型晶振，大体可分为五种：①总参57所和原1917所的基波特高频直振式晶振共四台；②1010所的泛音超高频直振式晶振共七台；③湖南大学的全固体集成晶振共六台；④原1917所的声表面波振荡器一台，这是延迟线型声表面波振荡器第一次参加全国比对；⑤总参57所的温补晶振一台。

3、工作频率的上限突破1 GHz大关

在第三届全国晶振比对中，工作频率突破1 GHz的有五台，它们是：总参57所的68号，基波特高频直振式晶振，1033.6 MHz；1010所的80号，1068.039 MHz；84A号，1431.2 MHz；84C号，1052 MHz；84D号，1007 MHz；这些都是泛音超高频直振式晶振。尽管在技术上还待进一步研究完善，但仍可认为已进入国际先进水平的行列。

4、小型化方面的重大进展

在前面的讨论中，已经知道了分立元件的最小体积是100多立方厘米，这对结构设计来说，已经是相当困难了。

在第三届全国晶振比对中，湖南大学的全固体集成晶振，把晶片和集成化的电路装在一起，体积仅有 $\Phi 10 \times 6.5 \text{ mm}$ （约为 0.5 cm^3 ，不含恒温系统），为我国晶振的小型

5、可靠性方面的进步

在第三届高稳晶振比对测试的通知中,明确规定:不准在比对过程中维修晶振,若在比对测试的过程中晶振有问题就作关机处理。这77台晶振,经过一个月的长期运行,没有一台作关机处理。只有少数几台,在比对测试过程中,个别的指标变坏。这么多单位的不同类型、不同结构的晶振,经过一个月的运行,基本上不出问题,不能不说是在可靠性方面经受住了考验。

6、测试技术的自动化程度提高

在第三届全国高稳晶振比对测试过程中,采用了HP—5390等仪器,用计算机将有关测试结果打印出来,为缩短比对测试周期实现自动测量积累了经验。总参五十七所在测试方案的选定、测试设备的配备上均付出了巨大的劳动,正是由于他们的辛勤劳动和中国计量科学研究院有关同志的密切配合,才使得第三届高稳晶振比对测试能顺利进行。而且提高了工效,减轻了测试人员的劳动强度。无疑,这是值得提倡的。

四、结束语

实践证明，通过“全国晶振比对测试与技术交流会”的形式定期组织全国同行进行比对测试与技术交流工作，对我国高稳晶振的现状进行调查，做到心中有数，对高稳晶振的发展起了推动作用；比对测试、技术交流和资料汇编三者结合起来，对高稳晶振的研制更加有利。经大家选举产生的常设领导小组团结一致、卓有成效地工作，赢得了同行的信赖。在我们这一行业，百花齐放，百家争鸣的气氛很浓，你追我赶、奋勇冲击，互相帮助、取长补短的局面业已形成。但是，指标越往上突越不容易，这就更加需要全国同行的协同作战。在我们面前有许多工作要做：比对测试自动化工作要加强；比对测试评分法要完善。尽快地叫青年人掌握这门技术，已经刻不容缓地提到议事日程上来。第四届全国比对测试的具体安排也有待进一步落实。展望未来，任重道远，我们深信，一个更加可喜的局面必将早日到来。

SC 切 石 英 諧 振 器

北京七〇七厂 罗福臻

序 言

在石英晶体工业发展过程中，厚度切变振动的AT切石英谐振器与伸缩振动和面切变振动的石英谐振器相比有体积小，频率温度特性好，机械强度好的优点，因此它很快地得到推广应用。四十多年来它在高频领域内一直占统治地位。几十年来在石英片的几

何尺寸设计上, 以及制造工艺上作了很大的改进, 并且在频率稳定度上也不断地得到提高。但在切型上, 始终没有什么新的突破。在五十年代和六十年代虽然也出现过双转角的IT切和RT切, 但是由于这两种切型存在着比较严重的缺点, 因此没有推广到实际应用中。随着电子计算机的发展及其应用的普及使人们能够比较容易地从理论上算出具有零温度系数的双转角组合。为双转角石英谐振器的研制创造了有利条件。1972年美国频率电子公司的Lagasee等研制成功了双转角的FC切石英谐振器, 其切角为 $YXWL + 15^\circ / + 34^\circ 40'$ 。FC切石英谐振器具有Q值高、短稳好、老化小、高温范围频率温度特性好的优点, 并且已用于原子频标、通讯卫星等重要工程中。FC切谐振器的研制成功对从事双转角石英谐振器研究的人们来说是一个很大的鼓舞。于是在石英谐振器的制造行业内双转角石英谐振器的研究工作大为活跃起来, 先后出现了SC切、TS切、TTC切等双转角的新切型。

SC切石英谐振器的特点

EerNisse系统地研究了厚度切变振动石英谐振器的应力效应, 他沿着零温度系数切角组合的轨迹(图1)计算了轨迹上各点的应力系数。通过计算得到当 $\Phi = 22.5^\circ$ 时应力系数为零, 他把这得到的 $\Phi = 22.5^\circ$ 、 $\theta = 34.3^\circ$ 命名为SC切、意即应力补偿的意思。后来Kusters由实验证实、应力系数为零的切角为 $\Phi = 21^\circ 56'$ 。如果以切角 $\phi = 21^\circ 56' \pm 1'$ 时的应力效应为1, 就可以得到图2所示的曲线。从图可2以看出, IT切的应力效应为SC切的140倍, FC切的应力效应为SC切的420倍, 而AT切的应力效应为SC切的830倍。

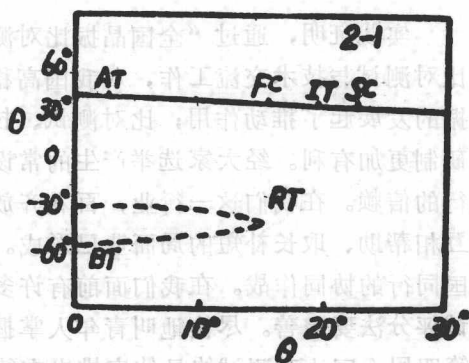


图1 零温度系数切角的轨迹

与EerNisse的同时, HP公司的Holland和Kusters从厚度切变石英谐振器热瞬变效应的角度进行了研究。得到了类似的结果, 曾先后发表了TS切和TTC切等双转角石英谐振器。实质上热瞬变效应也是一种应力效应, 由于温度的突变产生了箔膜和石英片之间的应力和支架的应力(由于材料的不同膨胀系数所引起)。实际上SC切、TS切和TTC切是同一种切型。只不过是不同的研究工作者从不同的角度进行研究给它起了不同的名称罢了。随着技术交流的开展很自然地就统一成一个名称SC切。

SC切除了具有应力补偿和热瞬变补偿这两个特点外, 在实际应用中还有以下特点:

- 1、开机特性好: 适合于快速加热工作, 频率过冲现象比AT切约小一个数量级, 开机后6分钟稳定度即能达到 2×10^{-9} 。
- 2、老化小: 由于应力效应小因此由应变的弛豫引起的老化小, 而应变弛豫效应是

高精石英谐振器引起老化的主要因素之一。SC切5 MHz高精石英谐振器的老化已经达到 10^{-12} /天的量级。

3、幅频效应小：可以承受较强的激励。SC切的幅频系数比AT切小一个数量级。这意味着SC切的激励可以比AT切大一个数量级。

4、短稳好：由于SC切可以承受较大的激励而不使老化大大变坏，因此可以得到很高的短稳，目前可以达到 10^{-13} /1~10秒。

5、抗辐射性能好：据报道SC切的抗辐射性能比AT切要好两个数量级，这对于空间应用和军事装备是十分重要的。

6、抗加速度性能好：加速度也是产生应力的原因之一，由于SC切应力效应小，因此抗加速度性能好，这在航天应用中也是十分重要的。

7、频率温度系数小：在转折点附近温度系数比AT切小一个数量级，因此对于同样精度的恒温槽可以大大改进振荡器的稳定度。或者说为了达到同样的精度对于SC切谐振器恒温槽的精度要求可以低一些。

8、高温范围（100℃以上）的频率温度特性和电阻温度特性好，因此能满足高温工作的要求。

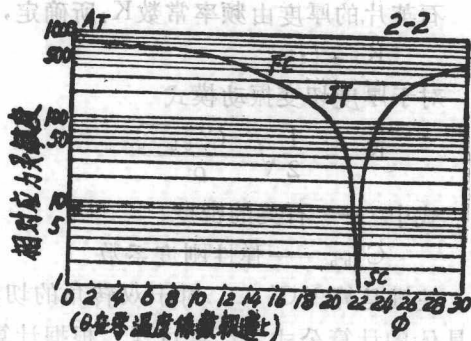


图2 应力效应和 ϕ 角的关系

实验内容

一、石英片的设计

1、频率点的选择

考虑到目前国内外最通用的是5 MHz高稳定度晶体振荡器，因此选用5 MHz作为试验的频率点，这样做可以利用现有的测试条件，便于比较、便于推广。

2、振动模（泛音次数）的确定

可以选用的泛音次数有3次泛音和5次泛音两种。考虑到5次泛音5 MHz SC切石英谐振器的动态电阻和动态电感都太大，在电路上不易起振。而且频率牵引量也很小，也就是说通过改变负载电容来调节振荡器频率的能力比较差，这就使振荡器调试比较困难，另一方面对石英谐振器的频率公差的要求更严，增加了制造的困难，因此决定选用3次泛音。

3、石英片几何尺寸的确定

在确定了石英谐振器的标称频率和泛音模式以后，就可以着手设计和计算石英片的几何尺寸。

（1）石英片厚度的确定

石英片的厚度由频率常数 K_f 所确定，有公式

$$K_f = f \cdot t \quad (1)$$

对于厚度切变振动模式

$$K = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C'_{bb}}{\rho}} \quad (2)$$

式中 ρ ——石英的密度，

C'_{bb} ——弹性刚度系数

关键是算出 C'_{bb} ，对于双转角的切型， C'_{bb} 的计算稍微复杂一些，我们这里不列出具体的计算公式和计算过程。根据计算结果并进行实验验证，得出3次泛音5MHz SC切石英谐振器石英片的厚度为1.095mm。相应的频率常数 $K_{f3} = 5475 \text{ KHz} \cdot \text{mm}$ ，折合成基频的频率常数 $K_{f1} = 1825 \text{ KHz} \cdot \text{mm}$ 。

(2) 石英片直径的确定

对于这种平——凸型的石英片，振动集中在片子的中央部分，片子的边缘处于相对静止状态，边缘效应很小，因此片子直径的选择范围较大。为便于利用现有的工装夹具，将石英片的直径选为15mm。

(3) 石英片曲率半径的确定

参照以前对3次泛音AT切和FC切5MHz石英谐振器的经验，选曲率半径为100mm。

(4) 切角的确定

我们以Kusters发表的关于SC切(或称TTC切)的切角 $\Phi = 21^\circ 56'$ ， $\theta = 33^\circ 56'$ 作为试验的出发点(见图3)。得出 $f-T$ 曲线表明 θ 角小了，频率温度系数偏正(见图4)。

第二次改为 $\Phi = 21^\circ 56'$ ， $\theta = 34^\circ 01'$ ，结果 θ 角仍小了，频率温度系数仍偏正。第三次改为 $\Phi = 21^\circ 56'$ ， $\theta = 34^\circ 06'$ ，得到了比较满意的 $f-T$ 曲线，如图4所示。在 $\Phi = 21^\circ 56'$ ， $\theta = 34^\circ 06'$ 的基础上又做了进一步的试验。 Φ 角仍为 $21^\circ 56'$ ，试了四组 θ 角，分别为 $\theta = 34^\circ 06'$ ， $34^\circ 07'$ ， $34^\circ 08'$ 和 $34^\circ 09'$ ，得到如图5所示的 $f-T$ 曲线，从曲线中可以看出SC谐振器的拐点温度 $T_i = 95^\circ \text{C}$ 左右，上转折点温度 $T_{\max}$ 在 85°C 以下，随着 θ 的增大而减小。从图5中还可以看出 $T_{\max}$ 在 60°C 左右时相应的切角为 $34^\circ 08'$ ，因此选定切角为 $\Phi = 21^\circ 56'$ ， $\theta = 34^\circ 08'$ 。

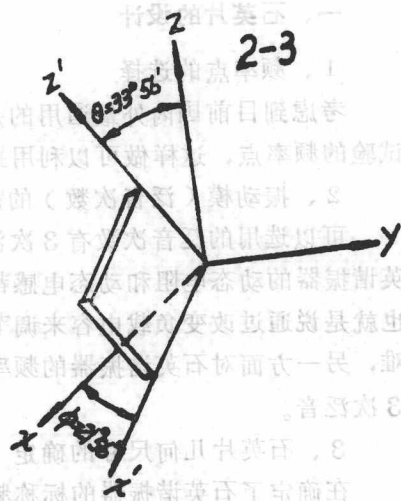


图3 SC切的方位图