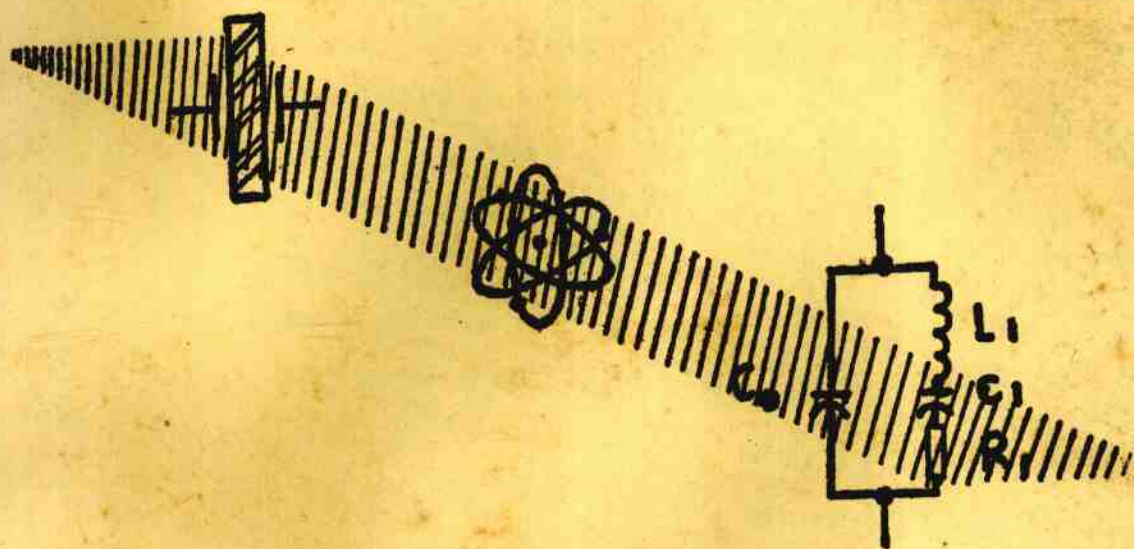


# 压电晶体及其应用

美国第38届频率控制年会论文选集

《压电晶体技术》编辑部主编



压电晶体专业科技情报网出版

## 前 言

美国频率控制年会是目前世界上唯一的有关频率控制和精密计时的学术讨论会。会议每年召开一次，并出版论文集(Proceedings of the Annual Symposium on Frequency Control)一册。其内容涉及面很广，有压电晶体基础理论，压电晶体器件制造方面的先进技术，压电晶体谐振器、滤波器和振荡器的最新研究成果，最新的声表面波器件和精密计时频标成果等。压电晶体器件在航天、航空技术，雷达、通讯、计量计测技术以及在民用装置方面都有广泛的应用。

论文集比较集中地反映了上述领域的最新成果和进展，很有参考价值。我们曾编译出版了第28、29、30、32、35、36和37届频控年会论文集《压电晶体及其应用》，向全国各地发行。1982年该书获得了电子工业部科技情报成果一等奖。

为了满足广大读者需要，根据“压电晶体情报网”成员单位共同商定，现又从38届频控年会(1984年召开)论文集中精选了部分文章编译出版，给广大科技人员学习参考。

参加本译文选集译校工作的网内成员单位有：电子工业部的707厂，607厂，754厂，746厂，10所，27所；邮电部一所等单位。

本届选集由电子工业部第十研究所情报室承担编辑、出版工作。由于水平有限，错误之处敬请读者批评指正。

《压电晶体技术》编辑部

一九八六年十月

# 目 录

## 石英、晶体特性

高纯度低位错石英的生长.....	( 1 )
生产型高压釜培育的低铝成分人造石英.....	( 7 )
阿尔法石英的常数.....	( 8 )
对石英进行电清洗和光辐照的研究.....	( 19 )
石英谐振器的伽马射线和质子束辐照的试验结果.....	( 27 )

## 晶体谐振器理论、设计和加工工艺

用于VHF晶体谐振器的反应式离子束刻蚀.....	( 38 )
AT、BT、x和y切石英晶片的腐蚀图和腐蚀速率.....	( 43 )
带负载电容的片状晶体谐振器.....	( 51 )
圆筒外壳封装的窄条型AT切谐振器.....	( 58 )
电极应力对石英棒长度伸缩振动和弯曲振动的影响.....	( 64 )
AT和SC切覆电极修外形石英谐振器的非线性谐振的分析.....	( 71 )
AT切矩形谐振器耦合模的分析和设计.....	( 84 )
AK切石英谐振器的谐波和非谐波模式.....	( 96 )
石英片尺寸和方位对双旋转石英片厚度振动频率温度特性的影响.....	( 105 )
关于凸面SC切石英谐振器零温度系数方位角随曲率半径的变化.....	( 125 )
用BVA和QAS设计的5MHz和10MHz谐振器的进展.....	( 135 )
石英晶体谐振器和振荡器的老化研究.....	( 146 )

## 滤 波 器

使用石英晶体弯曲谐振器的力传感.....	( 155 )
化学抛光基模体波石英晶体谐振器在高频滤波器上的应用.....	( 163 )
使用“介质谐振器”的从300MHz至几个GHz的新一代UHF滤波器.....	( 168 )

## 晶体振荡器

使用体波谐振器的基模UHF振荡器的性能.....	( 176 )
振荡器噪声模拟.....	( 180 )
平衡反馈振荡器.....	( 192 )
张弛石英晶体振荡器的分析和设计.....	( 198 )
晶体谐振器和振荡器快速升温的新方法.....	( 207 )
航天用高性能数字调频石英晶体振荡器.....	( 215 )

## 测量和技术规范

两种自动时间测试系统软件.....	( 219 )
压电器件用石英的技术规范.....	( 223 )
温度补偿晶体振荡器的进一步测试结果.....	( 236 )



# 高纯度低位错石英的生长

Alton F. Armington

**摘要** 在实验型和生产型的高压釜内以氢氧化钠和碳酸钠为溶剂进行了水热法生长试验。对一些实验型高压釜做的试验用了衬套。在这个研究过程中观察到的变化因素是掺锂以及培养体和籽晶的质量对 $\alpha$ 石英生长的影响。

## 序 言

目前高纯度低位错 $\alpha$ 石英的利用率还受到限制。这个限制一方面是由于对这种产品的需求还不高,另一方面是由于还不能用常规的方法生产这种石英。后一种限制是由于对生产高纯度低位错材料的各项准则还缺乏理解。空军和陆军都企图克服这个限制。作为改进频率和时间器件这个项目的部份,给Motorola公司一个课题以过去几年在实验型高压釜积累起来的经验为基础在生产用的高压釜中生产高质量的石英。相信这种高质量的石英能够改进精密时间器件所要求的辐射电阻、老化和短期稳定度。本文将讨论这个课题的初步结果。

认为对性能有影响的阳离子杂质是一价元素(锂、钠、钾)以及铝和铁。铝在石英中所起的作用已经被很多文献所证实。而且这种杂质看来对石英性能的影响最大。其它杂质在石英中所起的作用了解得还比较少。一价元素杂质和铝结合在一起形成电中性是产生偏移的原因,因为在相对比较低的能量条件它们很容易和铝分离。用电清洗(固态电解)的方法使氢代替一价元素杂质。氢结合得牢固,基本上避免了活泼的一价元素杂质。在石英中出现的另一种杂质是铁。这种杂质阳离子的含量通常比铝少。最近的工作指出这种杂质离子可能对石英的性能影响不大。这个工作当今的目标是把杂质含量减到 $1 \times 10^{-6}$ ,但对于铝我们希望减少到小于 $1 \times 10^{-6}$ 。迄今为止还没有对用这种材料做的谐振器进行测定。因此在作出这种测定之前这不得不认为是一个试探的目标。

位错对石英的性能有多大的影响知道的还不很确切。位错束是加工过程中形成腐蚀坑的主要原因这一点是明确的。位错为杂质准备了孔穴这种可能性也必须考虑。这些杂质是产生腐蚀沟的原因,而且在工作过程中可能迁移从而会影响谐振器的性能,如果能够消除位错就可以消除上述这些可能性。

## 实 验

水热生长试验是在不带衬套的生产型高压釜内进行的,带衬套的和不带衬套的高压釜的内径为1~4英寸。所有的炉身都有相似的仪器装备,并且用程序控制计算机进行

监控。用以评价生长好的 $\alpha$ 石英特性的技术已经发表在以前的年会上。

## 结果和讨论

### 溶剂

本课题目标之一是发展在氢氧化钠和碳酸钠溶剂中生长高纯度低位错 $\alpha$ 石英的能力。用典型的方法制备的试剂级溶液要进行分析确定它们的初始纯度主要是针对几种感兴趣的杂质。表1给出了这些数据。发现溶剂有相同的试剂级质量，它既不存在超过预期的杂质水平，同时杂质水平之间也没有明显的差别。用这种特殊的溶液做的生长试验在表1中用括号表示，对于锂没有进行分析，因为所有的溶液都故意地掺有这种阳离子。

表1 试剂级溶剂中典型的杂质含量(单位: PPM重量)

溶 剂	K	Al	Fe	总数
$\text{Na}_2\text{CO}_3$ (GC1)	0.7	0.5	0.5	1.7
$\text{NaOH}$ (GC4)	1.6	0.5	0.5	2.6
$\text{NaOH}$ (GC5)	0.7	0.5	0.5	1.7

为了探索在溶剂中掺锂的影响，在带衬套和不带衬套的高压釜中进行了一系列的不掺锂的试验，然后将那些晶体的杂质水平和掺锂的晶体进行比较(表2)，掺锂的晶体和不掺锂的晶体的其它生长条件都相同。所用的培养体是碎的人造石英其平均含铝量约为 $15 \times 10^{-6}$ ，迄今得到的数据表明对于不带衬套的试验不掺锂的晶体铁的含量大大增加。同时不带衬套生长出来的晶体铝的含量比带衬套生长的晶体要少得多。这些结果表明高压釜的钢壁成了各种化合物包括微量的铝和锂的集合中心。在这组试验以后其它的试验都在溶剂中掺锂。

表2 在溶剂中掺锂的影响

试验号	Z生长速率 (密尔/天)	衬套	$L_i$	$N_A$	K (PPMA)	$A_L$	$F_E$
X-39	16.0	无	1.0	1.5	<0.5	3.6	2.7
QA-20	28.0	有	4.7	1.1	<0.5	16.0	0.8
QA-21	21.0	有	4.0	1.2	<0.5	15.0	<0.5
X-35*	30.0	无	1.5	0.8	<0.5	3.6	<0.5
QA-25*	25.0	有	4.4	2.7	<0.5	13.0	<0.5

\* 在溶剂中掺锂

### 培养体

在这些生长试验中用了不同来源的培养体。表3简要地说明了生长 $\alpha$ 石英培养体的制备方法，生长试验运用了表中5种不同来源的培养体，人造石英I和人造石英II是由天然石英培养体连续重结晶而获得。人造石英III是将人造石英II的X区域除去以后得到

纯Z人造石英。合成 $\alpha$ 石英是由熔炼石英在带衬套的高压釜中以NaOH为溶剂培养出来的。表4是各种来源的培养体杂质含量的比较,本文所给出的PPm值除了特别注明以外都是由原子吸收光谱测定。对于人造石英I和III表中给出的杂质含量是由Z区域取样测定的。众所周知X区域通常杂质含量较高,因此平均的PPm值将比表中给出的要高(例如人造石英II和人造石英III相比)。转换得到的培养体原料钠的含量较高可能是由于溶剂给吸入到所分析的样品中。

表3 培养体原料的制备



表4 培养体原料典型杂质含量的比较

培养体原料	$L_I$	$N_A$ (PPM重量)	K	$A_L$	$F_E$	总数
合成石英	0.8	342.0	0.5	2.3	1.0	346.6
天然石英	2.5	10.0	3.4	21.0	2.7	39.6
人造石英I	1.3	8.3	<0.5	6.0	<0.5	16.6
人造石英III	0.8	2.5	0.7	2.4	0.8	7.2

用各种培养体生长了一些石英晶体并且对其中杂质含量高的进行了分析。表5比较了用各种培养体生长的石英晶体的杂质含量,用纯Z重结晶人造石英作培养体生长的人造石英其含铝量比用天然石英作培养体生长的人造石英减小了14ppm左右,这些数据表明能够用不带衬套的高压釜生产高纯度的人造石英。事实上,用人造石英III作培养体生长的晶体和用光学石英作培养体生长的晶体几乎是相等。

表5 由不同的培养体生长的晶体的典型杂质含量

培养体原料	$L_I$	$N_A$	K (PPM重量)	$A_L$	$F_E$	总数
合成石英	<0.5	<0.5	<0.5	0.6	<0.5	2.6
天然石英	3.0	8.8	1.3	14.5	0.7	28.3
人造石英I	1.1	3.3	0.8	3.9	0.8	9.9
人造石英II	0.7	2.5	<0.5	1.7	<0.5	5.9
人造石英III	<0.5	0.9	0.5	0.6	<0.5	3.0

### 衬套试验

对于大多数探索性试验都用衬套，一方面是为了便于清洗另一方面是为了提高晶体的纯度。表6给出了衬套试验的一些结果。这些试验中只有纯Z材料（人造石英Ⅲ）作培养体。结果表明用了高质量的培养体以后不论用衬套或不用衬套都可以得到很高纯度的晶体，在我们目前分析技术的精度以内带衬套和不带衬套生长的晶体其纯度基本上是相同的。应当强调指出对于所有不带衬套的试验，每次试验都必须对高压釜进行彻底的清洗，甚至需要用化学的方法进行清洗。如果不进行这样的处理我们发现较高的杂质含量。关于用银衬套能否减少包裹体的数量，这个问题就目前已经生长出来的晶体看还没有得到解答。但是我们已经生产了足够样品能够确定在分析这些数据时有没有重大的差异。

表6 衬套对晶体纯度的影响

试验号	Z生长速率 (密尔/天)	衬套	$L_1$	$N_A$	K (PPMA)	$A_L$	$F_E$
X46A	16.0	无	<0.5	2.3	<0.5	0.8	0.5
X50A	20.0	无	1.9	<0.5	2.2	<0.5	0.8
X50B	25.0	无	1.5	<0.5	<0.5	0.9	0.8
X52	16.0	无	<0.5	1.5	<0.5	<0.5	0.5
QA33	22.0	有	<0.5	0.6	<0.5	<0.5	0.8
QA36	28.0	有	<0.5	1.8	<0.5	<0.5	<0.5
QA31	20.0	有	<0.5	0.5	<0.5	<0.5	0.9

### 加大高压釜内径的影响

表7给出了不同内径的高压釜的一些结果。表中所给出的数据都是用不带衬套的高压釜得到。显然这些数据是代表一些得到的纯度最高的数据，它比通常报导的已经生长出来的 $\alpha$ 石英的数据要好。试验A、B和C是由试验型高压釜进行的。试验D和E代表两个不同的石英制造厂的数据。所有试验都用高质量的培养体，但用的不是同一种原料。

表7 不同的高压釜生长的晶体的杂质含量

晶体	高压釜内径 (英寸)	$L_1$	$N_A$	K (PPMA)	$A_L$	$F_E$
A	1	<0.5	1.5	<0.5	<0.5	0.5
B	3	<0.5	2.3	<0.5	0.8	0.5
C	4	<0.5	0.7	0.7	<0.5	<0.5
D	10	<0.5	1.5	<0.5	0.5	<0.5
E	13	<0.5	1.4	<0.5	0.9	<0.5

对表7中所分析的各块晶体的杂质含量没有办法再进行细分，这是受到目前所用的分析方法的可靠检测限度所限止。表8给出了在低杂质含量时电子对共振(EPR)和原子

吸收(AA)结果的比较。晶体X是由内径3"的高压釜生长的,晶体Y是由商用的高压釜生长的,晶体Z是由带衬套的高压釜生长的。看来对于这样的杂质含量水平,这两种方法也勉强能测量,不能区分得很细。最近我们借助了一台感应耦合四极质谱仪,据报导它可以达到 $10^{-9}$ 量级的精度。我们开始用这种技术来测定一些材料,我们希望在今后几个月中能够评价这种技术的精度。到目前为止我们的分析方法对于非常低的杂质含量还不能得到很精确的结果。

表8 用原子吸收和电子对共振测得的含铝量的比较

样品	原子吸收	电子对共振
X	<0.5	0.12
Y	<0.5	0.80
Z	<0.5	1.20

### 籽晶的影响

为了确定籽晶的制备过程对生长出来的晶体质量的影响,对大部分情况我们只用高Q( $2.4 \times 10^6$ )和低腐蚀沟密度( $111/\text{cm}^2$ )籽晶。籽晶是 $O^0X$ 切的而且每一片籽晶都经过认真地X—射线定向。所有的籽晶都用偏光镜检查看有没有应变存在。在少数的情况下,当发现籽晶中有应变,就把应变的位置记录下来,然后将籽晶装在生长架上,因此就可以辨认,长出来的晶体可以排除在水热生长试验结论之外。在这些早期的生长试验中有些籽晶是从已经生长好的晶体的+X区域切下来的,然而这些籽晶被定为纯Z $O^0X$ 籽晶。

表9列出了用于制备籽晶的3种主要的腐蚀液。三种腐蚀液用来腐蚀籽晶时每次都是在室温下分别腐蚀5~10分钟。但对于二氟化氮腐蚀液用来腐蚀籽晶时一直腐蚀到60分钟,每次为5分钟。表中列出的第三种腐蚀液是唯一用在比较高的温度和特别长的时间。目的是用化学抛光产生半透明的籽晶来生长晶体。

表9 用于纯Z籽晶的腐蚀条件

腐蚀液	腐蚀时间	腐蚀温度
7.0M $\text{NH}_4\text{HF}_2$	5—60	22
48% HF	5—15	22
40% $\text{NH}_4\text{F}$ + 28% HF (等容积)	5—90	22;75

用这些籽晶制备技术生长出来的晶体发现在腐蚀沟密度上有小的差别。但是发现有应变的籽晶长出来的晶体腐蚀沟密度比没有应变的籽晶长出来的晶体要高。表10比较了这些结果。这些数据也表明在同一个试验中有应变的晶体,钠的含量比没有应变的籽晶长出来的晶体高。关于这个观察的更多的数据正在收集中。根据目前测得的数据还看不出平均生长速率和两组晶体腐蚀沟密度之间的差异有什么联系。



表10 有应变和没有应变的纯 Z 籽晶生长的晶体的比较

试验号	没有应变的籽晶			有应变的籽晶		
	Z 生长速率 (密尔/天)	$N_A$ (PPM)	$\rho$ ( $CM^{-2}$ )	Z 生长速率 (密尔/天)	$N_A$ (PPM)	$\rho$ ( $CM^{-2}$ )
GC1	21.2	8.8	158	21.2	12.0	518
GC8	19.0	7.1	185	19.6	11.0	372
GC11	31.2	1.9	166	31.8	3.2	308
GC12	20.3	8.0	203	19.3	8.5	388
平均值	22.9	5.5	178	23.0	8.7	397

晶体的X-射线形貌图

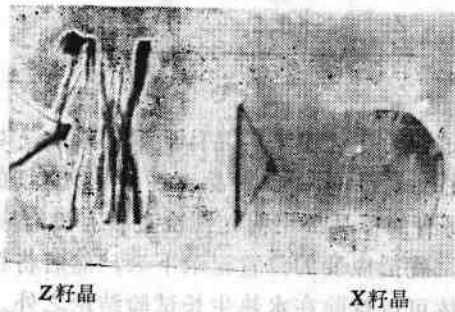


图1 在同一个试验中 Z 籽晶和 +x 籽晶生长的晶体位错密度的比较

用从 +X 区域切出的 Z 籽晶可以得到低的腐蚀沟密度。我们正继续这项工作并取得了一些成功。图 1 给出了在同一次试验生长的两块晶体的形貌图。其中一块晶体是由从 +X 生长区切出的 Z 籽晶生长的。另一块是由标准的 Z 籽晶生长的。从图中可以看出用 +X 籽晶材料可以使位错大大减小。用这种籽晶生长的晶体的腐蚀沟密度初步测定为 2、18 和 22/cm<sup>2</sup>，比没有经过电清洗的晶体所报导的结果要低得多。用衬套也许能够得到更好的结果，但我们还没有足够的据来核实这一点。这项研究正在进行中。

## 结 论

这个课题的初步结果表明只要用低杂质含量的培养体和各种型号的高压釜不用衬套都能够得到高纯度的  $\alpha$  石英。至于长出来的晶体在杂质含量上有没有真正的差别有赖于本文提到的更灵敏的分析方法。

纯 Z 籽晶上有应变会使腐蚀沟密度和钠的含量增高。在 +X 区切出的纯 Z 籽晶生长的晶体其腐蚀沟密度比没有应变的纯 Z 籽晶生长的晶体还要小得多。

还需要对大批晶体的谐振器特性进行测定以便和晶体的质量连系起来。

### 参考文献(略)

罗福臻 译  
陈瑞龙 校

# 生产型高压釜培育的低铝成份人造石英

Baldwin Sawyer, D.R. Kinloch

## 背景

近期对人造石英抗辐射性能的研究(或耐辐射)要求石英在它 Z-区域铝的含量是 1 PPM 或少于此值。在银衬套中以不透明高纯度二氧化硅生长的不寻常高纯度石英是在 82 年频率控制年会报告中提出的,它进一步证实了预计的优点。

## 发展

索耶研究产品人造石英工厂于 82~83 年期间在无衬里的生产型高压釜内慢慢地生长了两次低铝含量的人造石英。这一试验部份是由 USAF 支持的,使用先前生长石英作培养体。其它三次低铝含量的生长也是选用了高纯度培养体来缓慢生长的。

## 分析

从五个生长周期取的这些样品经电子顺磁共振分析结果如表中所示,并给出详细的生长条件、使用的培养体及用红外光谱表示的 Q 值。

已开始对这些材料包括生长及电清洗(例如固态的电解处理)进行了大量的使用试验。初步表明这些产品的 Q 值很高,但全面的计算在发表此文时尚未完成。

表 1 高压釜生长含铝量低的石英过程一览表

特性: 高压釜内容积 261 升  
 生产过程 水热 2 室  
 一般生长压力 82.7 MPa (12000 Psi)  
 一般生长温度范围 340~360°C  
 溶液 0.8 M Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, 0.05 M LiNO<sub>2</sub>

生长周期编号	平均 Z 生长率 mm/天	培养体材料	Z 生长区的铝含量(EPR分析)PPM			红外确认的 Q 值 10 <sup>6</sup>
			平均	最大	最小	
H33—31 *	0.37	用 Z 块晶体培育	0.6			3.3
F12—46 *	0.29	用 y 棒晶体培育	0.97	1.15	0.79	3.7
F36—43	0.23	用 y 棒晶体培育	0.4			2.7
F27—43	0.28	阿肯色石英	0.6			2.9
G23—37	0.28	巴西培养体	0.8	1.0	0.6	3.3

\* 工程费用一部分由 USAF 资助

# 阿尔法石英的常数

Roger W. Ward

**摘要：**凡是进行石英晶体器件计算的人都要在他的方程式中使用物理常数的数值。然而，和任何物理常数一样，没有这种可以指定为石英常数的绝对值——只有一种在受控的试验室条件下，对各种有资料记载的样品进行多次观测的基础上建立起来的“最优值”。

随着时间的推移和多方地努力，石英工程师积累起自己常用的石英常数的“最优值”。当进行新的计算包含难解的常数时，仍然需要查文献寻找这种难解的数值。

作者进行了这种文献的查找工作，并且列出了 $\alpha$ 石英的“优值”常数表。

## 术 语

本文使用的“石英”这个词是指在温度低于 $573^{\circ}\text{C}$ 的电子结晶 $\text{SiO}_2$ ，天然的或是人造的（人工培养的）。

历史上使用过水晶、低温石英、 $\alpha$ 石英和结晶石英等术语来称呼“石英”。

在某些工业的现代应用中，使用“石英”这个术语来称呼熔融石英——加热到熔点之上的石英。熔融石英没有压电性，没有结晶性；因而对石英工程师来说，没有任何用处。SOSMAN说〔(1)P43〕：不能过于谴责用“石英”这个词来表示玻璃态石英。它是由于粗心或无知所引起并造成了麻烦的混淆。SOSMAN建议使用“石英玻璃”或“熔融石英”来称呼这种材料。

有些石英工程师把人工培养的石英叫做合成石英。合成有“非真实”的内涵，本文回避了这个词，因为人工培养的石英是“真实”的石英。

## 结束语

本文给出一些计算如下：

- 1) 在无衬里生产型高压釜中生长的石英，Z生长区长的铝含量小于1PPm，使用了二个控制的结合，慢生长和低铝含量的培养体材料（确信少于10PPm铝）。
- 2) 铝含量的允许误差应在最后使用的测试结果时提出，这样可以采取二种不同的方法来取得耐辐射的石英特性，即经过电清洗的石英和未经过电清洗的石英。
- 3) 除了耐辐射的要求外，在其它用途中，用铝含量来表征培育石英的特性将是一个有用的方法。

陈瑞龙 译

经和贞 校

## 历史

从人们第一次拿到石英起，就知道了石英的一个物理常数——密度。之后又对石英的大部分物理常数进行研究和测量。在这个题目的文献中有数千个基准值。许多测量今天看来价值不大，因为试验的细节经常被忽略——例如，温度、石英的产地、标准条件等等。

大部分地方获得的石英不适用于电子用途，因为有过多的双晶、包裸体和裂纹。在第二次世界大战期间，使用的石英全是天然石英，大部分产于巴西。从那以后，人工培养石英技术获得发展，以至人工培养的石英几乎独占了电子应用领域。

这里给出的常数也许仅适用于最高级人工培养的石英——仿制的相当接近天然石英的人工培养石英。用质量低的人工培养石英制造的器件，其物理常数和天然石英有相当的差别，和其它同样的天然石英器件相比，出现相当大的误差。

## 实际器件

由于任何理论都采用假设，同时也由于计算的器件或许和用来测得给定物理常数的元件之间有不同的几何尺寸（直径，轮廓，电极尺寸），还由于制造公差（特别是定向角度）等诸项因素，通常对于双转角切割要从理论上预言石英器件的性能优于相当约 $\pm 0.5^\circ$ 的定向角是不可能的。

为了更好地改进理论，需要制造一个实际器件的原型——除了在定向上有一严格控制的微小变化之外，全是同样的结构设计。

例如，EerNisse (2) 在1975年预言 SC 切处于  $\varphi = 22^\circ 30'$ 。Kusters 和 Leach (3) 由试验表明他们的晶体设计  $\varphi = 21^\circ 56'$ ，差  $34'$ 。Kusters 和 Leach 用仔细调整的试验来确定  $\varphi$ ，其中包括 EerNisse 预言角度定向的原型，仔细的测量，以及用计算机处理数据来确定零热瞬时效应的定向角（假定 Eer Nisse 的内平面压力和 Kusters、Leach 做热瞬时试验的测量机理相同）。

类似的情况还有，Adams 等人 (4) 用和制做谐振器一样精密定向的原型来确定石英弹性强度的温度系数，正好和 Bechmann 等人 (5) 用中等定向精度的不同晶体设计方法所确定的同样系数相对立。而且，还没有一套常数象实际制做的那样可以预言 SC 切的温度性能优于相当  $0.5^\circ$  的定向角，但是两者都可用于预言 SC 切温度曲线的存在及其形状，都可以通过切割试验，重复制做一、二次实际器件，做到足够精确地靠近曲线。人们还能有什么更多的要求呢？

往往还要求进行同样的试验来最后确定所期望的晶体器件的定向。（除非理论扩展到可以包括现在还不能解决的边界条件、有限直径、轮廓表面和薄膜应力、装配应力等影响。）

## 常数

1927年，Sosman (1) 出版了一本800页的书，讲多种形态中二氧化硅的物理特性，重



点放在石英上。Sosman 详细地研究了文章中提到的每一种特性的多种测试方法，并在他自己的实验室中进行了试验。他指出了各位研究者的错误与疏忽，力求得出石英常数的“最优值”。因此，Sosman 通常是这里介绍的常数的主要来源。

在参考文献中，还有许多有意义的历史性注释，这些注释实在太多了，不能在这里一一列出，这里仅提出 Virgrl Bottom 博士强调“压电之父”居里做出的历史贡献的意见：“因此，居里能够得到石英  $d_{11}$  的数值和今天所得到的最优值只差 7%，这是很了不起的。从 1880 年至 1970 年间，对石英  $d_{11}$  进行了不下三十次的独立测量，有一半的数值还不如居里在 1880 年给出的数据更为公众接受。”Bottom 博士得出结论：“……确实可以说居里为现代电子通讯奠定了基础。”(6)

由于上面提到的原因，表 1 所列的常数未表明“特定”常数、“最优”常数，仅表明了“优值”常数。“特定”常数仅出现在特定设计的特定晶体上。改变设计，某些可测常数将改变。采用同一高压釜或同一晶簇（在一个矿洞中自然生长的晶体）中的另一块石英，常数也不一样（至少可达现代测量技术发展水平所允许的精度）。

表 1 结晶石英的“优值”基本材料常数

常数名称	数值	参考文献
轴向比 c/a	1.1015 ※ -250℃	SOSMAN [1] P. 205, 368—370.
	1.1014 -200	
	1.1009 -100	
	1.1003 0	FRONDEL [7] P.7, 20, 39
	1.0996 100	
	1.0988 200	
	1.0979 300	
	1.0960 400	
	1.0956 500	
	1.0946 550	HEISING [8] P.103
	1.0940 573	
	1.09997 ?	
1.100 20	CADY [9] P.27	
*****		
温度系数	$-6.14 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \times 9^{\circ}\text{C}$	FRONDEL P.39 SOSMAN P.277
成份	硅 46.72% 重量比 氧 53.28%	SOSMAN P.22, 27

续表 1

压缩系数 体积(真值)	2.76 × 10 <sup>-6</sup> /Kg/cm <sup>2</sup> ※	0Kg/cm <sup>2</sup>	SOSMAN P.426—433
	2.65	2039	
	2.53	4079	
	2.42	6118	
	2.33	8157	
	2.25	10197	
	2.18	12236	
	注: 1兆微巴 = 10 <sup>6</sup> 达因/cm <sup>2</sup> = 1.0197 Kg/cm <sup>2</sup>		
导热性	平行	垂直	温度
	--	0.68	-252°C
	0.117	0.0586	-190
	0.0476	0.02409	-78
	0.0325	0.01731	0
	0.0215	0.01333	100
	0.029	0.016	20
	cal/cm/s/°C		FRONDEL P.116
居里温度 (低—高转换, α—β转换)	573.3°C	(加热)	SOSMAN P.116—125 FRONDEL P.3, 117 CADY P.31
密度, 绝对值	2.65067 g/cm <sup>3</sup> ※	0°C	PRONDEL P.114
	2.64822	25	CADY P.412
	2.665g/cm <sup>3</sup> ※	-250°C	SOSMAN P.361
	2.664	-200	(P.291—295)
	2.659	-100	
	2.651	0	
	2.641	100	
	2.630	200	
	2.616	300	
	2.601	400	
	2.581	500	
	2.554	573	

续表 1

<p>温度系数, 真值</p>	<p><math>1.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}</math> ※ -200°C 25.2 -100 33.6 0 40.0 100 46.6 200 54.9 300 67.4 400 100 500 141 550</p>	<p>SOSMAN P.291, 362, 366 (前表) 附录 FRONDEL P.114</p>
	<p>***** <math>T^1 = -34.92 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}</math> <math>T^2 = -15.9 \times 10^{-9}/^{\circ}\text{C}^2</math> <math>T^3 = 5.30 \times 10^{-12}/^{\circ}\text{C}^3</math> (以25°C为参考)</p>	<p>BECHMANN (5) CADY P.412</p>
<p>介电常数</p>	<p>4.6 平行于 Z 轴 4.60 4.5 垂直于 Z 轴 4.51</p>	<p>SOSMAN P.515 BOTTOM (10) SOSMAN BOTTOM CADY P.414, FRONDEL P.116</p>
	<p>***** <math>\epsilon_{11}^T = \epsilon_{22}^T = 39.97 \times 10^{-12}\text{F/m}</math> <math>\epsilon_{11}^S - \epsilon_{11}^T = -0.76</math> <math>\epsilon_{33}^T = 41.03</math> <math>\epsilon_{33}^S - \epsilon_{33}^T = 0</math></p>	<p>BECHMANN</p>
<p>温度系数</p>	<p>平行 <math>K = 4.926 [1 - 1.10 \times 10^{-3}(T - 10) - 2.4 \times 10^{-5}(T - 10)^2]</math> 垂直 <math>K = 4.766 [1 - 9.9 \times 10^{-4}(T - 10)]</math> <math>T = 10 \sim 31^{\circ}\text{C}</math></p>	<p>SOSMAN P.523 AND GRAPH P.524</p>
	<p>***** K = 0 ~ 2000 V/cm (平行) K = 0 ~ 12000 V/cm (垂直)</p>	<p>CADY P.415</p>

续表 1

弹性系数三级	$C_{111} = -2.10 \times 10^{12}$ 达因/cm <sup>2</sup> $C_{112} = -3.45$ $C_{113} = +0.12$ $C_{114} = -1.63$ $C_{123} = -2.94$ $C_{124} = -0.15$ $C_{133} = -3.12$ $C_{134} = +0.02$ $C_{144} = -1.34$ $C_{155} = -2.00$ $C_{222} = -3.32$ $C_{333} = -8.15$ $C_{344} = -1.10$ $C_{444} = -2.76$	THURSTON (11)
电场强度	$4 \times 10^6$ V/cm ※ -80°C 7 ※ 60	CADY P.413
硬度, 穿透 (AUERBACH) MHO 划痕	$30.8 \times 10^8$ Kg/cm <sup>2</sup> 平行于 Z 22.9 垂直于 Z 7 667 (刚玉 = 1000)	SOSMAN P.491 SOSMAN P.494 SOSMAN P.494
热容量 真值	$5.4 \times 10^{-3}$ cal/g ※ -250°C 41.0 -200 111.2 -100 166.4 0 204.3 100 232.7 200 254.3 300 270.0 400 291.0 500 340 (?) 573 (20°C时的克数)	SOSMAN P.314, 331
溶解热	$30.29$ Kg-cal/formula wt in $34.6\%$ HF	SOSMAN P.318
转换潜热 (低→高石英)	$2.5$ cal/g $0.15$ Kg-cal/formula wt	SOSMANP.312



续表 1

点阵常数 "a"	4.9035 Å ※ 4.903 4.91331 4.90288 4.91267	18°C ? 25 25 25	SOSMAN P.226 HEISING P.103 FRONDEL P.25 CADY P.735 CADY
磁敏性 (真空)	平行 $-1.21 \times 10^{-6}$ -0.45	垂直 $-1.20 \times 10^{-6}$ -0.45	类别 体积 质量 SOSMAN P.576
磁-旋光性 (VERDET 常数)	0.15866 min ※ 0.04617 0.02750 0.02257 0.01664 0.01368 * * * * *	2194.92 Å, 20°C 3612.5 4678.15 5085.82 5892.9 6438.47	SOSMAN P.776
温度系数	$W = W_{20}[1 + 0.00011(T - 20)]$ T = 20 ~ 100°C		SOSMAN P.777
熔点	<1670°C		FRONDEL P.3
穿透模量	平行 1062 Kg/cm <sup>2</sup>	垂直 859 Kg/cm <sup>2</sup>	SOSMAN P.465
压电系数	拉伸 $d_{11} = -2.30 \times 10^{-12} \text{m/v}$ $d_{11} = -2.27$ $d_{11} = -2.25$ $d_{11} = -2.30$ $d_{14} = 0.57 \times 10^{-12} \text{m/v}$ $d_{14} = 0.85$ $d_{14} = 0.67$ 注: 1 esu/达因 = $3 \times 10^4 \text{m/v}$ $d_{11} = 2.32 \times 10^{-12} \text{m/v} \quad \times \quad 1.5^\circ \text{K}$ 2.32 2.31 2.22 2.05		SOSMAN P.559 BOTTOM[12] HEISING P.20 CADY P.219 SOSMAN HEISING CADY GRAHAM[13] 4.2 -196°C 20 -100