

THE STUDY OF ACTIVATION ENERGY(EA) BY AGING AND HIGH TEMPERATURE STORAGE FOR QUARTZ RESONATOR'S LIFE EVALUATION

CHUN-NAN SHEN, XIAO-WEI YANG, COLIN CHANG, MIN-CHIANG CHAO

TXC (NINGBO) Corporation, 189 Huangshan West Rd, Beilun District, Ningbo, Zhejiang 315800, China

E-mail: {obi-wan, nxiaoweiyang, ncolin, chaomk}@txc.com.tw

This paper studied the mechanisms and models of activation energy(Ea) based on the experiment data from quartz resonator long-term aging and high temperature storage. Furthermore, the product's life could be forecasted under the thermal and bias accelerated environment. 5.0 mm × 3.2 mm metal sealed quartz resonators were used for case study, it indicated the activation energy of high temperature storage which only effected by thermal acceleration factor is higher than aging one. The activation energy of long-term aging shows cube decay tendency when thermal and bias accelerators both exist, that would dramatically reduce the predicted accuracy of product life. The activation energy of current manufactured 5.0 mm × 3.2 mm metal sealed quartz resonator was confirmed as 0.578eV by regress verification according to the Arrhenius accelerated theory, 85°C for 7days accelerated aging can predict and guarantee which is equivalent as continue operation for 0.83 year at 25°C without fail.

Keywords: Aging, High Temperature Storage, Activation Energy, Quartz Resonator

老化与高温储存对活化能(Ea)晶体谐振器件影响及产品寿命评估

沈俊男 杨晓玮 张建聪 赵岷江

台晶(宁波)电子有限公司

电子邮件: {obi-wan, nxiaoweiyang, ncolin, chaomk}@txc.com.tw

本文透过长时间(long-term)的可靠性老化(Operation Life)与高温储存(High Temper Storage)定义出影响晶体谐振器(Quartz Resonator)活化能(Ea)的机制与模型, 进而可预估热或电压加速环境作用下对产品寿命的影响。此预估模型仅针对 5.0 mm×3.2 mm 的金属焊封晶体谐振器, 并指出在纯粹仅有热加速因子的高温储存相对起同时有热与电压的可靠性老化有着较高的活化能; 在热与电压两项加速因子影响下, 活化能会随着长时间老化的作用呈现递减的趋势, 进而大幅增加产品寿命预测的不合理性。现有台晶(宁波)电子 5.0mm × 3.2mm 金属焊封晶体谐振器的 Ea 值经回归验证分析后确认为 0.578eV, 通过阿伦尼斯(Arrhenius)加速寿命理论, 可预测并保证经过可靠性老化 85°C@168hrs(7天)的产品等效该产品于 25°C连续工作 7389hrs(0.83 年)不失效。

关键词: 老化, 高温储存, 活化能, 晶体谐振器

1. 可靠性温度加速因子与等效寿命预估

电子元器件制造商在成本考虑下往往不会对产品进行长时间的常温测试来确保产品的使用年限, 因此电子元器件一般皆通过可靠性加速试验[1, 2, 3]来对产品的有效寿命进行预估并保证, 此间最广泛应用于预估被动式元器件的等效年限公式, 乃依据阿瑞尼斯

$$AFT = e^{\left[\frac{Ea}{K_B} \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_a} \right) \right]} \quad (1)$$

(Arrhenius)研究材料间交互扩散行为所提出的温度加速因子(Temperature Acceleration Factor, AFT)为圭臬, 如公式(1)所示。其中 AFT 为温度加速因子, $K_B = 8.616 \times 10^{-5}(\text{eV}/^\circ\text{K})$ 为波兹曼常数 (Boltzmann's constant), $T_a(^\circ\text{K})$ 为加速环境温度, $T_u(^\circ\text{K})$ 为常温工作温度, Ea 为活化能。宏观晶体谐振器的可靠性测试条件不外乎为 125°C, 105°C, 85°C 三个温度, 由公式(1)可明显得知晶体谐振器的 Ea 值才是决定其等效寿命的关键参数, 因此本文提供两种有效的活化能评估手

法来求得晶体谐振器的活化能, 表 1 为当加速温度为 125°C 时, 试算 Ea 值由 0.7(eV) 变化至 0.3(eV) 对 AFT 与产品等效寿命评估的影响度。

表 1. 产品活化能(Ea)对温度加速因子的影响

T _L (°C)	T _H (°C)	Ea(eV)	K(eV/°K)	Tu(°K)	Ta(°K)	AFT
25	125	0.7000	8.617*10 ⁻⁵	298	398	943.17
25	125	0.6000	8.617*10 ⁻⁵	298	398	354.53
25	125	0.5000	8.617*10 ⁻⁵	298	398	133.26
25	125	0.4000	8.617*10 ⁻⁵	298	398	50.09
25	125	0.3000	8.617*10 ⁻⁵	298	398	18.83

根据可靠性对 AFT 的定义, 当其值为 18.83 时表示该产品于加速环境 125°C@1 单位时间等效于 25°C@18.83 单位时间, 由此可清楚得知晶体谐振器活化能(Ea)的真值对产品寿命评估有着极大的影响性, 亦是台晶(宁波)电子身为晶振制造商不得不面对与必须研究议题。

2. 动态老化实验求取产品活化能(Ea)

1990 年后随着电子元器件的蓬勃发展与应用, 相信晶体谐振器制造商皆有其可靠性预计模型与理论, 但基于晶振产业的特殊性, 其不同于电阻与电容的活化能已公定为标准值且可藉由互联网查找, 迫使探讨晶体谐振器活化能的文献不得不追溯早先学者们的研究成果[4, 5]。动态老化(Dynamic Aging)为晶体谐振器在高温作用下亦透过 RLC 振荡回路设计使得外加电流得以对器件产生连续工作, 老化频率的偏移可透过公式(2)表达为电流, 温度, 时间的关系式[6]

$$\frac{\Delta f}{f}(i, T, t) = R(i) \cdot R(T) \cdot R(t) \quad (2)$$

由于影响电流的机制受到 RLC 振荡回路匹配性与 IC 集成电路自身老化的影响, 故在假设 R(i)忽略不计的前提下, 公式(2)可简化表达为公式(3) [7]

$$\frac{\Delta f}{f}(T, t) = R(T) \cdot \ln(1 + bt) \quad (3)$$

当中 $R(T) = C \cdot e^{\left(\frac{-E_a}{K_B \cdot T}\right)}$, 若不考虑时间的影响公式(3)可表达如公式(4)所示, 即频率偏移与温度作用的关系式为

$$\ln \frac{\Delta f}{f} = \ln C - \frac{E_a}{K_B} \cdot \frac{1}{T} \quad (4)$$

2.1. 老化实验设计

本文透过 QASH-1000 动态老化设备对 5.0mm × 3.2mm 金属焊封晶体谐振器, 取样 60 产品进行 125°C, 105°C, 85°C 长达 1000hrs(约 42 天)的频率实测, 结果如图 1 所示

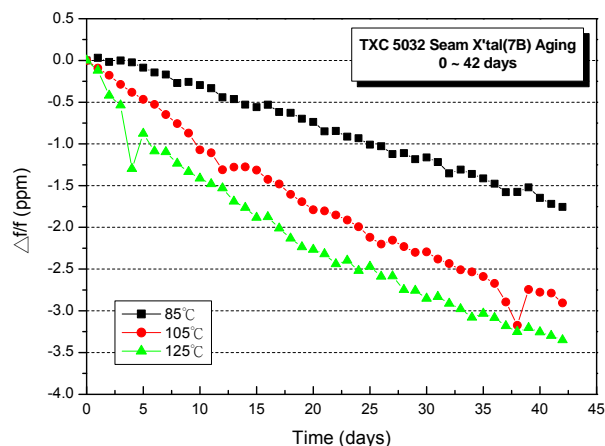


图 1. 5.0mm × 3.2mm 金属焊封晶体谐振器老化 1000 hrs 频偏

本文特别选取对产品可靠性较具代表性的时间点 168hrs(7 天), 336hrs(14 天), 504hrs(21 天), 744hrs(31 天), 1000hrs(约 42 天)进行活化能讨论, 并透过公式(4)对图 1 于 125°C, 105°C, 85°C 的实测频偏取对数作为 y 轴, 温度取倒数作为 x 轴, 即可透过线性关系求得斜率与 Ea。不同老化作用时间下的 Ea 值如图 3 所示, 可明显看出 Ea 值会随着长时间老化的作用呈现递减趋势, 随着 Ea 值由 0.578eV 到 0.200eV 的大幅变化, 产品在表 2 的等效寿命估算下有显著截然不同的 AFT 表现。

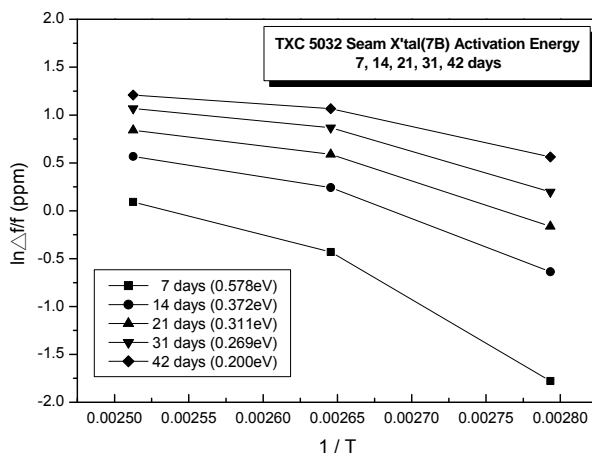


图 3. 不同老化作用时间的产品活化能

表 2. 产品 85°C 下温度加速因子的等效寿命估算

T _L (°C)	T _H (°C)	Ea(eV)	K(eV/°K)	Tu(°K)	Ta(°K)	AFT
25	85	0.5780	8.617*10 ⁻⁵	298	358	43.49
25	85	0.3724	8.617*10 ⁻⁵	298	358	11.37
25	85	0.3109	8.617*10 ⁻⁵	298	358	7.61
25	85	0.2699	8.617*10 ⁻⁵	298	358	5.82
25	85	0.2004	8.617*10 ⁻⁵	298	358	3.70

2.2. 阿瑞尼斯预测模型与活化能(Ea)回归验证

为了能准确定义并验证 Ea 真值的合理性, 进一步将等效时间的影响性内入考虑, 当公式(3)中的 $bt \gg 1$ 时, 可得到频率偏移同时为温度与时间的关系式, 如公式(5), 公式(6)所示, 其中 b 为常数。

$$\frac{\Delta f}{f} = R(T) \ln b + R(T)(t) \quad (5)$$

$$\frac{\Delta f}{f} = C \cdot e^{-\frac{Ea}{K_B T}} \cdot \ln t \quad (6)$$

参考文献[7]假设高温频偏与低温频偏比值对老化作用的影响, 即可将公式(6)表达如公式(7)

$$\text{if } \delta f_L = \frac{\Delta f}{f} L, \text{ and } \delta f_H = \frac{\Delta f}{f} L$$

$$\Delta = \frac{\delta f_H}{\delta f_L} = \frac{\ln t_H}{\ln t_L} \cdot e^{\frac{Ea}{K_B} \left(\frac{1}{T_L} - \frac{1}{T_H} \right)} = \frac{\ln t_H}{\ln t_L} A \quad (7)$$

其中 t_H 为短期高温作用的时间, t_L 为长期低温作用的时间, 且为了方便验证不同 Ea 值下高温频偏与低温频偏的比值, 公式(7)可另行表达如公式(8)所示

$$\Delta = \frac{\delta f_H}{\delta f_L} = \frac{\ln t_H}{\ln t_L} \cdot \exp \frac{1}{K_B} \left(\frac{1}{T_L} - \frac{1}{T_H} \right) Ea \quad (8)$$

此时即可将图 3 求得的 Ea 值带入公式(8)模型中将其与老化真实测得的高低温频偏比进行回归验证, 125°C/85°C, 125°C/105°C, 105°C/85°C 三者回归验证的结果如表 3-1, 表 3-2, 表 3-3 所示。纵观表 3 的高低温频偏比不难发现, 与 125°C 有关的回归验证模型当其 Ea 值愈低时会使得模型计算与实测的高低温频偏较为接近, 唯有表 3-3 的 105°C/85°C 验证模型中有最高的 Ea 值, 即相对高的 AFT 值。

表 3-1. 125°C/85°C 阿瑞尼斯模型回归验证

125°C vs 85°C Verification						
Formula Prediction by Real Ea						Real Ratio
Ea	7	14	21	31	42	NA
Ea	0.578013	0.372427	0.310908	0.269896	0.200391	NA
$\Delta_{7/7}$	15.03107	9.684854	8.085088	7.018578	5.211112	6.49192205
$\Delta_{7/14}$	11.08317	7.141131	5.961544	5.175152	3.842416	3.33605441
$\Delta_{7/21}$	9.607128	6.190086	5.167594	4.485933	3.330689	2.73223042
$\Delta_{7/31}$	8.517538	5.488039	4.581513	3.977162	2.952939	2.39158677
$\Delta_{7/42}$	7.825495	5.04214	4.209269	3.654021	2.713016	1.91014095

表 3-2. 125°C/105°C 阿瑞尼斯模型回归验证

125°C vs 105°C Verification						
Formula Prediction by Real Ea						Real Ratio
Ea	7	14	21	31	42	NA
Ea	0.578013	0.3724266	0.310908	0.269896	0.200391	NA
$\Delta_{7/7}$	2.704136	1.7423349	1.454532	1.262664	0.937495	1.688279
$\Delta_{7/14}$	1.993896	1.2847114	1.0725	0.931026	0.691262	1.383131
$\Delta_{7/21}$	1.728352	1.1136154	0.929666	0.807033	0.599201	1.286363
$\Delta_{7/31}$	1.532331	0.987315	0.824228	0.715504	0.531243	1.223733
$\Delta_{7/42}$	1.407831	0.9070965	0.75726	0.65737	0.48808	1.153561

表 3-3. 105°C/85°C 阿瑞尼斯模型回归验证

105°C vs 85°C Verification						
Formula Prediction by Real Ea						Real Ratio
Ea	7	14	21	31	42	NA
Ea	0.578013	0.372427	0.310908	0.269896	0.200391	NA
$\Delta_{7/7}$	3.212913	2.070151	1.728199	1.500231	1.113883	3.84529
$\Delta_{7/14}$	2.369043	1.526427	1.274289	1.106196	0.821322	2.411959
$\Delta_{7/21}$	2.053537	1.32314	1.104581	0.958875	0.71194	2.123997
$\Delta_{7/31}$	1.820636	1.173076	0.979305	0.850124	0.631195	1.954337
$\Delta_{7/42}$	1.672711	1.077765	0.899737	0.781052	0.579911	1.655865

推测造成预测模型差异的原因可能是 125°C 高温下不纯粹只有晶体谐振器在进行老化, 亦包含了 RLC 振荡回路或 IC 集成电路的持续衰老进而对活化能产生了影响。为了能更有效表达验证模型, 透过公式(8)对表 3 的高低温频偏比取作为 y 轴, 活化能作为 x 轴, 绘得图 4 和图 5, 可清楚看出当回归验证模型的拟合时间愈长, 虚线透过阿瑞尼斯模型推得的高低温频偏比会愈接近实测值, 因此台晶(宁波)电子认定 5.0mm × 3.2mm 金属焊封晶体谐振器透过动态老化测得的有效 Ea 值为 0.578eV。

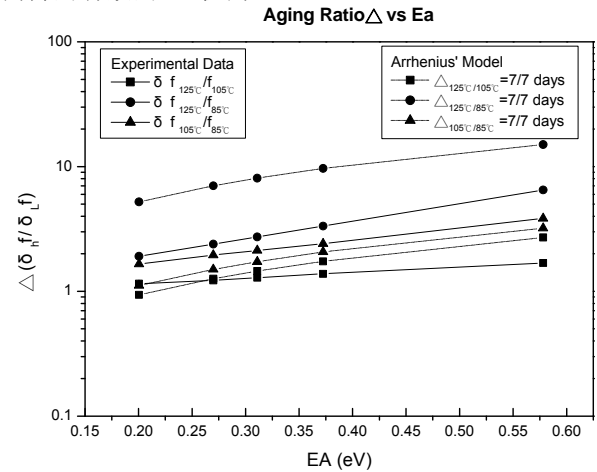


图 4. 高温 7 天与低温 7 天回归验证模型比对

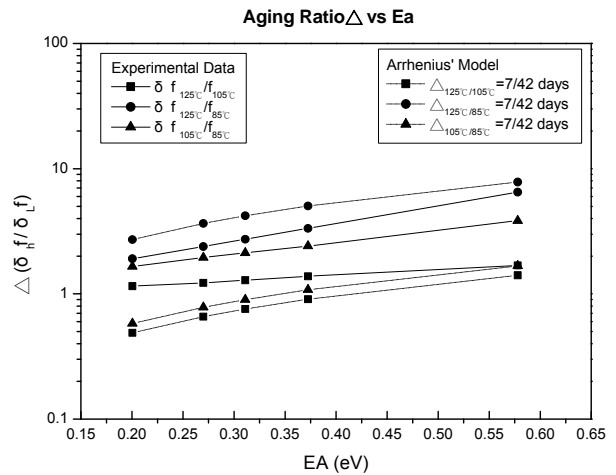


图 5. 高温 7 天与低温 42 天回归验证模型比对

3. 静态高温储存之 MTBF 失效数求取活化能

为了研究可靠性静态高温储存与动态老化对 E_a 的差异性, 本文亦参考了中华人民共和国国军标规范的 MTBF 失效法[8]来求取高温储存的 E_a , 公式(9)为阿瑞尼斯的古典方程

$$\ln t = a + b \cdot \frac{1}{T} \quad (9)$$

若将 t 替换为平均无故障时间(Mean time between failures, MTBF), 则可将公式(9)转化表达为公式(10)

$$\ln(MTBF) = \ln\left(\frac{n \times t}{r}\right) = \frac{E_a}{K_B} \cdot \frac{1}{T} \quad (10)$$

其中 n 为样品数量, t 为实验时间, r 为失效产品数量, 表 4 为高温储存的实验设计, 透过不同频偏规格可计算出样品的失效总数, 但有效区块的选择必须满足电子元器件的一般失效原则, 方能视为有效的 MTBF 值。以表 4 为例 $\pm 5\text{ppm} / \pm 5\Omega$ 对应 1921 hrs 的失效数, 其失效不符合电子元器件温度愈高失效数愈多的原则, 故不得作为 E_a 平均计算的依据。

表 4. 高温储存的实验设计与不同规格下的失效数

Device Hours			Failure Number						
Samples	Time(H)	Total Time	$\pm 4\text{ppm} / \pm 4\Omega$	$\pm 4.5\text{ppm} / \pm 4.5\Omega$	$\pm 4.8\text{ppm} / \pm 4.8\Omega$	$\pm 5\text{ppm} / \pm 5\Omega$	$\pm 5.5\text{ppm} / \pm 5.5\Omega$	$\pm 5.8\text{ppm} / \pm 5.8\Omega$	$\pm 6\text{ppm} / \pm 6\Omega$
30	1074	32220	18	8	1	1	0	0	0
30	1074	32220	30	26	20	18	6	2	0
30	1074	32220	30	28	26	25	20	15	11
30	1074	32220	30	30	29	27	21	20	14
30	1921	57630	30	25	19	15	4	1	1
30	1921	57630	30	29	29	29	21	14	10
30	1921	57630	29	29	29	27	19	16	12
30	1921	57630	30	30	29	29	25	22	16

表 5. 高温储存的平均无故障时间

T(K)	1/T	MTBF(=T)						
		$\pm 4\text{ppm} / \pm 4\Omega$	$\pm 4.5\text{ppm} / \pm 4.5\Omega$	$\pm 4.8\text{ppm} / \pm 4.8\Omega$	$\pm 5\text{ppm} / \pm 5\Omega$	$\pm 5.5\text{ppm} / \pm 5.5\Omega$	$\pm 5.8\text{ppm} / \pm 5.8\Omega$	$\pm 6\text{ppm} / \pm 6\Omega$
358	0.00279	1790.00	4028	32220	32220			
378	0.00265	1074.00	1239	1611	1790	5370	16110	
398	0.00251	1074.00	1151	1239	1289	1611	2148	2929
423	0.00236	1074.00	1074	1111	1193	1534	1611	2301
358	0.00279	1921.00	2305	3033	3842	14408	57630	57630
378	0.00265	1921.00	1987	1987	1987	2744	4116	5763
398	0.00251	1987.24	1987	1987	2134	3033	3602	4803
423	0.00236	1921.00	1921	1987	1987	2305	2620	3602

最后再将区块内的数据继续依公式(10)计算出产品 MTBF 与透过线性拟合出斜率 E_a 值, 结果如表 5 和表 6 所示, 台晶(宁波)电子 $5.0\text{mm} \times 3.2\text{mm}$ 金属焊封晶体谐振器静态高温储存的 E_a 平均值为 $0.569(\text{eV})$ 。

表 6. 高温储存的 E_a 平均值为 $0.569(\text{eV})$

$E_a (\text{eV})$						
$\pm 4\text{ppm} / \pm 4\Omega$	$\pm 4.5\text{ppm} / \pm 4.5\Omega$	$\pm 4.8\text{ppm} / \pm 4.8\Omega$	$\pm 5\text{ppm} / \pm 5\Omega$	$\pm 5.5\text{ppm} / \pm 5.5\Omega$	$\pm 5.8\text{ppm} / \pm 5.8\Omega$	$\pm 6\text{ppm} / \pm 6\Omega$
0.0935	0.2462	0.6313	0.6220	0.3767	0.6946	0.1399
-0.0019	0.0334	0.0774	0.1166	0.3298	0.5735	0.5180
0.5693						

4. 结论

本文实际测试纯粹仅有热加速因子的静态高温储存与同时有热与电压的动态老化, 两种不同分析手法有着极为相近的活化能, 意味者 $R(i)$ 电流的影响在 $5.0\text{mm} \times 3.2\text{mm}$ 金属焊封晶体谐振器无显著的差异, 使用静态高温储存来辅助预测动态老化的 E_a 值求取是可行的。在热与电压两项加速因子影响下, 活化能会随着长时间老化的作用呈现递减的趋势, 进而大幅增加产品寿命预测的不合理性, 故必须透 Arrhenius 回归验证才能证明 E_a 值的准确性。在台晶(宁波)电子 2009 年及 2010 年连续两年的信赖性研究认定 7 天动态老化的 $E_a=0.578(\text{eV})$ 较具有代表性, 并作为产品等效寿命推估的基础。在可靠性 1000hrs 老化频偏 $\pm 5\text{ppm}$ 规格下, 动态老化 $85^\circ\text{C}@168\text{hrs}$ (7 天)的产品等效该产品于 25°C 连续工作 7389hrs(0.83 年)不失效, $105^\circ\text{C}@168\text{hrs}$ (7 天)的产品等效该产品于 25°C 连续工作 19687.92hrs(2.24 年)不失效。

致谢

本文工作得到了国家火炬计划项目资助 (No.2007GH010123)。

参考文献

1. 张增照, 潘勇, 电子产品可靠性预计, 科学出版社, 2007.
2. 温熙森, 可靠性强化试验理论与应用, 科学出版社, 2007.
3. 顾瑛, 可靠性工程数学, 电子工业出版社, 北京, 2004
4. R. Filler et al, The aging of resonators and oscillators under various test conditions, *Proc. 38th AFCS*, **444**, 1987
5. A. A. Feinberg, Parametric failure rate model for quartz crystal device aging with application to surface acoustic wave filters, *Proc. 41th AFCS*, **360**, 1987
6. D. Epstein, Application and use of acceleration factors in microelectronics testing, *Solid State Technology*, **116**, 1982
7. M. R. Miljkovic, G. L. Trifunovic, V. J. Brajovic, *42th AFCS*, **404**, 1988.
8. 中华人民共和国第四机械工业部, 恒定应力寿命试验和加速寿命试验方法总则, 中华人民共和国国家标准(GB 2689.1-81), 1981