



VISHAY VITRAMON

www.vishay.com

The DNA of tech.™

多层陶瓷电容器 (MLCC)

白皮书

X7R MLCC 恒定直流偏压下容量随时间漂移

0603 封装 X7R 100 nF, 50 V MLCC 对比案例研究 (Vishay 与三家制造商)

作者: Paul Coppens, Eli Bershadsky, John Rogers 和 Brian Ward

摘要

根据多层陶瓷电容器 (MLCC) 制造商的数据表明, 典型容量电压系数 (VCC) 和老化 (无偏压) 引起的容量损耗是补充指标, 容量不会随时间进一步显著漂移。然而, 近期对 X7R MLCC 恒定直流偏压 (称为直流偏压老化) 条件下容量随时间漂移的研究却表示, 容量随时间的变化远大于典型 VCC 和正常老化效应产生的变化。此外, 一家汽车制造商指出, 关键系统问题与容量损耗和 DC/AC 偏压老化有关。[1] 这一问题促使 Vishay 对四家制造商的 0603 封装 X7R 100 nF, 50 V MLCC 的直流偏压老化进行了对比研究。

Vishay 和其他三家制造商的 MLCC 分别接受了额定电压 40 % 和 100 % 时的直流偏压老化分析, 持续时长超过 1000 小时。经过周期性时间间隔后, 所有施加相同直流偏压的样品接受了容量测量。结果证实, X7R 电容器长时间在直流偏压下会导致容量下降, 比老化引起的自然漂移要大得多。与 Vishay 电容器相比, 其他三家厂商的器件随时间的推移容量损耗更大。1000 小时后, Vishay 电容器剩余容量最高。同时观察到, 消除偏压后, Vishay 电容器容量恢复速度比竞品器件快得多。

简介

几十年来, 因容量高、等效串联电阻小、成本低以及高温焊接组装不敏感等特点, 多层陶瓷电容器 (MLCC) 成为许多表面贴装应用的首选。器件电气特性的稳定性很大程度上取决于所用介电材料的性质。两种常用陶瓷介质分别是 I 类和 II 类。I 类材料基于顺电陶瓷, 是一种非常稳定的低损耗介电材料, 由于介电常数低, 容量范围更为有限。由于具有时间、温度和电压的自然稳定性, 因此本研究不包括 I 类电容器。II 类为基于铁电陶瓷的高介电常数材料, 可实现高容量值, 但代价是损耗大, 电气特性稳定性下降。几个因素都会影响 II 类电容器电气特性的稳定性。其中最主要的有温度、DC/AC 电压振幅、频率和容量时间老化。虽然直流电压对容量的影响以及无偏压老化导致容量逐渐下降在业内众所周知, 但随着时间的推移, 直流电压对容量的长期影响往往会被忽略。最近, 在出现应用问题之后, 这种被称为直流偏压老化的特性受到更多关注。简要回顾无偏压老化和 VCC 效应, 将有助于更好地理解直流偏压老化的机制。

VCC 效应和无偏压老化与 II 类 MLCC 的铁电性质有特殊的联系。铁电介质的一个特点是自发永久极化。这种自发极化使铁电晶体中的偶极子有序排列, 从而形成所有偶极子方向相同的铁电畴。[2, 3] 电畴浓度和偶极子排列直接影响介电常数 K , 因此电畴的任何变化或重新定向都会影响 K , 从而影响以下公式表达的容量:

X7R MLCC 恒定直流偏压下容量随时间漂移

$$C = \frac{nA\epsilon_0 K}{t}$$

式中：

C = 容量

n = 介质层数

A = 每个导电板重叠面积 (m²)

ϵ_0 = 自由空间介电常数 (8.854 x 10⁻¹² F/m)

K = 介电常数

t = 各介电层分离厚度 (m)

VCC 效应说明

II类介质中，陶瓷自发极化和电畴的相关发展是初始高容量的主要原因。如果将极化表示为磁场的函数，如图1所示，则可获得磁滞回线。所示磁滞曲线为钛酸钡基介质的典型变化。最初，极化率很高，但随着电场的增加，极化率逐渐趋平。因此，容量随着施加偏压的增加而减小，如图2的 VCC 图所示。

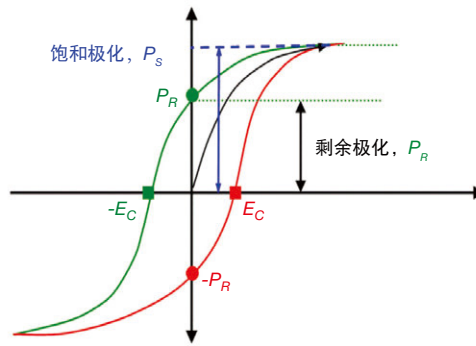


图 1 - 陶瓷电畴与施加电场的关系 (磁滞回线)

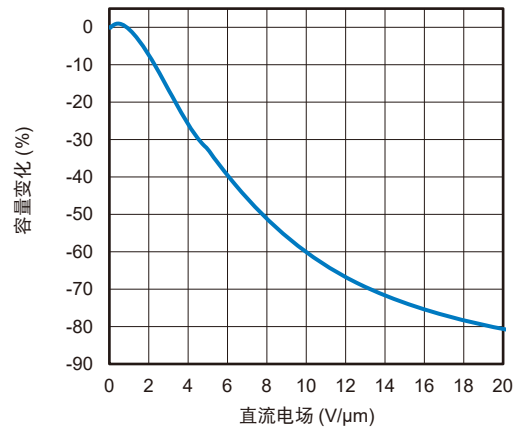


图 2 - 典型2类电容表示为外加直流偏置电场 (VCC) 的函数

X7R MLCC 恒定直流偏压下容量随时间漂移

铁电陶瓷老化现象

当温度超过居里点时，钛酸钡呈立方晶体结构。这种状态下，电介质不是铁电体，不会发生自发极化。当温度下降到居里点以下时，晶体结构变为四方相。这种情况下，钛原子永久偏离晶格中心，产生永久极化。随着时间的推移，电畴不断进行重新排列，内部应力下降。这种电畴缓慢重新排列造成容量随时间下降。通常，老化遵循对数定律，其数学表达式为：

$$C_t = C_0 \left(1 - \frac{A}{100} \cdot \log_{10} t \right)$$

式中：

C = 时间 t 之后的容量

C₀ = 初始容量

A = 老化常数

通常，老化率约为每十年变化 1% 或 2%。实际上，这意味着，去老化后 1 小时到 10 小时，容量下降 1% 或 2%。10 小时到 100 小时，以及 100 小时到 1000 小时容量下降相似。如图 3 所示，通过将介质温度加热到居里点以上，消除电畴可逆转这种老化过程。当温度下降到居里点以下时，再次形成电畴，老化过程从头开始。

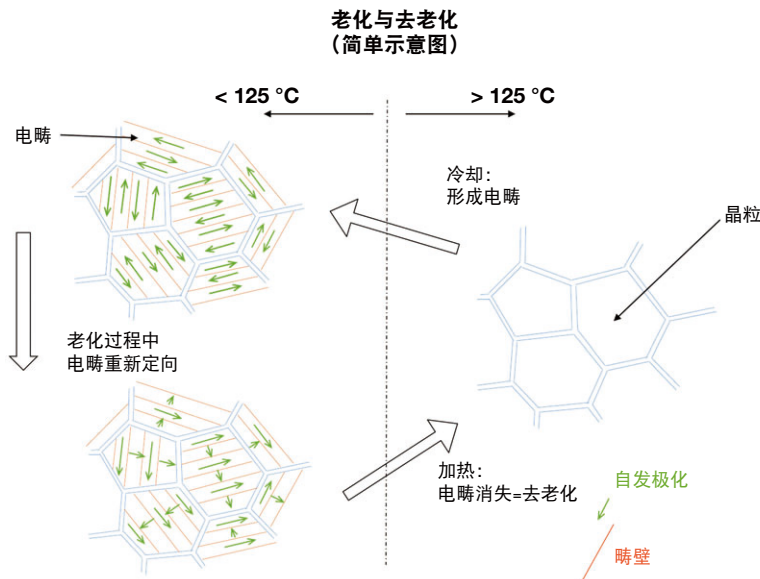


图3 - 铁电陶瓷老化现象[4]

一般来说，VCC 效应和老化效应在很大程度上是独立现象。直到最近，人们还认为应用直流偏压可以将容量降低到规定水平。在持续固定直流偏压下，预计容量因老化率只会缓慢下降。然而，最近关于直流偏压影响下容量随时间变化的研究报告表明，容量随时间漂移可能比正常老化效应大得多。[5][6] 如果在应用中，电容长时间置于直流偏压下，仅了解 VCC 和老化效应不足以正确预测容量随时间的变化。

X7R MLCC 恒定直流偏压下容量随时间漂移

直流偏压老化试验装置和程序

10个分别来自 Vishay 和其他三家 MLCC 制造商的 0603 封装 X7R 100 nF, 额定电压 50 V 的电容器样品安装在印刷电路板(PCB)上。测试前, 在 150°C 条件下, 对所有电容器进行 1 小时去老化处理。安装在 PCB 上的电容器插入夹具中, 在整个测试期间加 40% 和 100% 额定电压的恒定直流偏压。经过规定时间后, 从夹具中暂时取出 PCB, 部件仍保留大部分电荷。然后在施加相同测试电压和极性下测量电容量, 再将 PCB 重新放回固定装置, 继续进行 1000 小时偏压老化。

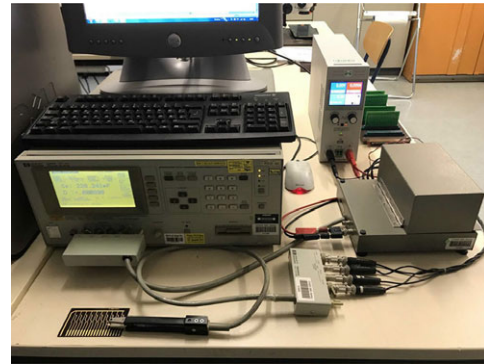


图4 - 测试设备装置图片

长期置于室温 40% 额定电压下

在一组样品上, 所有电容均加 40% 额定电压(20 VDC)。电容在此电压下静置 10 分钟, 以稳定 VCC 初始效应。图 5 显示容量损耗随时间变化的百分比。图中给出偏置电压和 VCC 直接影响后的相对电容损耗基准。参考基准将初始电容损耗率标准化为 0%, 并重点关注每个制造商的直流偏压老化率。

20 V 偏压条件下, 0603 封装 X7R 100 nF, 50 V MLCC 相对容量随时间的变化

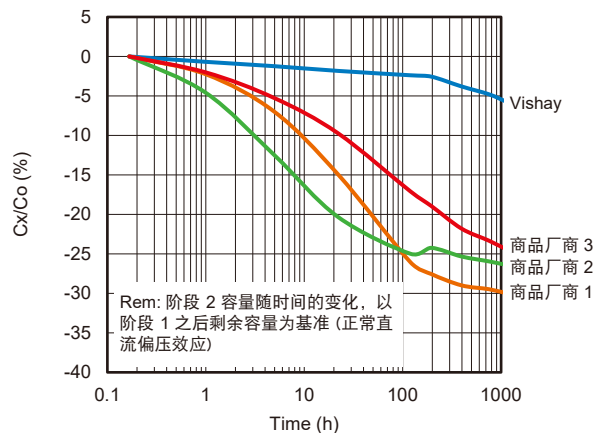


图5 - 20V偏压直接影响之后容量损耗随时间基准变化%

所有竞品器件直流偏压老化率远比通常规定的每十年 1% 至 3% 更为显著。例如, 100 小时后, 竞品厂商 2 的器件平均每时段损耗 10%。1000 小时后, 所有竞品 MLCC 的损耗率均超过其容量的 20%。虽然损耗率远非线性的, 但 3 个时段后 (1 小时到 1000 小时), 40% 额定直流偏压老化下, 竞品厂商器件每一指数段平均损耗率超过 7%。Vishay 电容器在整个测试期间保持相对稳定, 但 100 小时到 1000 小时, 损耗率略有增加。由于漂移较小, Vishay 电容器的剩余容量最高 - 1000 小时后总损耗增加 5%。所有电容器 1000 小时后直流偏压老化速度减慢, 预计达到所用介质的极限值。

X7R MLCC 恒定直流偏压下容量随时间漂移

长期置于室温 100% 额定电压下

第二组样品，电容加 100% 额定电压 (50 VDC)。目的是观察更高电场对直流偏压老化的影响。图 6 显示容量随时间的损耗，同样以加 50 V 偏压后的容量为基准。将图 5 的 40% 偏压损耗与图 6 的 100% 偏压损耗进行对比，图 6 显示容量损耗速度更快。竞品电容最初显示直流偏压影响下，容量漂移要比 Vishay 电容大得多，后者 100 小时仍然相当稳定。而在大约 1000 小时偏压下，这种优势逐渐丧失。

0603封装 X7R 100 nF, 50 V MLCC 50 V偏压下相对容量时间变化

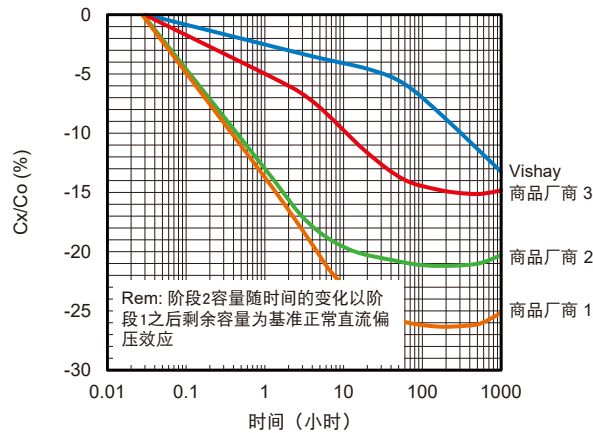


图6 - 50 V偏压直接影响之后容量损耗随时间基准变化%

长时间 100% 偏压后容量恢复率

为评估电容长期置于 100% 偏压后的恢复性能，消除电压 (0 V)，持续短接部件端子以防止剩余电压聚积。然后，每隔一段时间测量一次无偏压有效容量。

50 V 偏压 1000 小时后, 0603 封装 X7R 100 nF, 50 V MLCC 容量恢复 (零偏压)

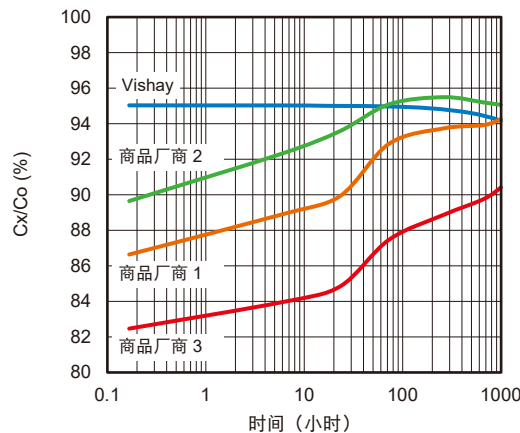


图7 - 50 V_{DC} 偏压1000小时后容量恢复 (0 V偏压)

如图7所示，消除直流偏压后，容量自长期置于 100% 偏压下的容量漂移中缓慢恢复。室温下，竞品器件恢复过程较慢，需要 50 小时至 1000 小时才能接近 95%。相比之下，Vishay 电容恢复速度相当快，几乎达到初始值的 95%。所有被测电容在 150 °C下进行一小时热处理后，容量可恢复到 100% (完成去老化和容量漂移恢复)。



X7R MLCC 恒定直流偏压下容量随时间漂移

结语

长时间置于室温 40% 额定电压下

X7R 电容长时间置于直流偏压下会导致容量下降，这种情况远比老化引起的自然漂移要严重。竞品电容直流偏压影响下，容量漂移比 Vishay 器件大得多，后者在 1000 小时内更为稳定。由于直流偏压影响下容量漂移很小，Vishay 电容器较长时间之后剩余容量最高。这一结论适用于 2.5 V/μm 的直流偏压场。由于 MLCC 很少在 100% 额定电压下使用，这种电压应力条件适用于这一电场下的大多数 MLCC。

长时间置于室温 100 % 额定电压下

与置于 40% 额定电压直流偏压下一样，X7R 电容器长时间置于直流偏压下容量漂移会很严重。满额定电压下，容量漂移速度更快。在直流偏压影响下，竞品电容最初容量漂移比 Vishay 电容大的多，Vishay 电容在 100 小时内能够保持更为稳定的容量。Vishay 器件的优势在 1000 小时左右逐渐减弱。这一结论适用于 6 V/μm 及以上的直流偏压场。

恢复速度

消除直流偏压后，竞品电容的容量恢复速度比 Vishay 器件慢得多，消除偏压后，Vishay 电容的容量几分钟即可恢复到 95%。竞品电容需要 50 小时到 1000 小时，甚至更长时间才能恢复到容量的 95%。在 150°C 下进行 1 小时热处理后，所有被测电容的容量均恢复至 100%。

结论

Vishay 关于直流偏压老化对 II 类 MLCC 影响的引导性测试支持之前的报告。试验证明，Vishay 电容受直流偏压老化的影响最轻，其容量随时间漂移变化最小。

本研究不是调查 MLCC 制造商之间性能差异的物理、化学或材料原因。不过，温度加热到高于居里点之后，容量完全恢复似乎表明，直流偏压老化与长期置于偏压场下导致电畴结构变化存在时间依赖性。此外，Vishay MLCC 采用贵金属技术生产。测试的三个竞品器件使用贱金属技术制造。这些材料差异可能是解释老化处理存在差异的一个因素。

显而易见，容量损耗与直流偏压老化是工程师设计评估期间需要了解的一个关键特性。因此，Vishay 开始对我们的 X7R 介电系统进行直流偏压老化测试，以为此提供数据。Vishay 直流偏压老化试验至少进行 100 小时或更长时间，在室温下加 20%、40% 和 60% 额定电压。

参考文献

- [1] Open Letter to AEC-Q200 Committee, High CV MLCC Class II DC/AC Bias Aging Capacitance Loss Issue, Tomas Zednicek Ph.D., pp. 3, September 2019 Issue 1.0
- [2] Principles of Electronic Ceramics, chapter 6, L.L. Hench and J.K. West, Wiley Interscience
- [3] Introduction to Ceramics, chapter 19, W.D. Kingery et All, Wiley Interscience
- [4] Mechanisms of Aging and Fatigue in Ferroelectrics, Yuri A. Genenko et All, Elsevier Materials Science and Engineering B
- [5] Effects of MgO Doping on DC Bias Aging Behavior of Mn-Doped BaTiO₃, Dong Woo Hahn et All, Japanese Journal of Applied Physics Vol. 47, No. 7, 2008, pp. 5526 to 5529
- [6] Mechanism of Capacitance Aging Under DC Bias Field in X7R-MLCCs, Takaaki Tsurumi et All, J. Electroceram (2008) 21:17-21