

高压 IGBT 模块在湿度影响下的寿命预估模型研究

摘 要

本文介绍了高压 IGBT 模块在湿度影响下的寿命预估模型。此模型涉及的湿度加速因子是从温湿偏置试验中提取的；高压 IGBT 的温湿偏置试验在不同的湿度和不同的电压下进行测试，目的是为了找出湿度和电压对高压 IGBT 寿命的影响。最终，我们把湿度和电压对高压 IGBT 寿命的影响以及温度因数都集成到寿命预估模型中。通过试验，我们同时发现湿度对高压 IGBT 模块的寿命有很大影响。

1、引 言

在一些电力电子应用场合，不仅需要高压 IGBT 模块有优异的性能，还需要具有相当高的可靠性；为了满足实际需求，希望高压 IGBT 模块的寿命能达到 30 年，所以，高压 IGBT 模块的寿命预估非常重要。以前，尽管我们都知道湿度会对高压 IGBT 模块的寿命产生很大影响，但是没有一个准确的寿命预估模型把湿度因素考虑进来。三菱电机持续研究湿度对高压 IGBT 模块可靠性的影响，从而得到新的高压 IGBT 模块的寿命预估模型，通过这个模型来预估高压 IGBT 的寿命。同时，三菱电机通过采用 SCC(Surface Charge Control)技术开发了新一代高压 IGBT 模块，具有抵御高湿度的能力。

2、高湿引起高压 IGBT 模块失效机理

三菱电机对湿度引起的失效模式进行了研究。高湿引起高压 IGBT 模块的失效机理详见 PCIM 2015 论文[2]。

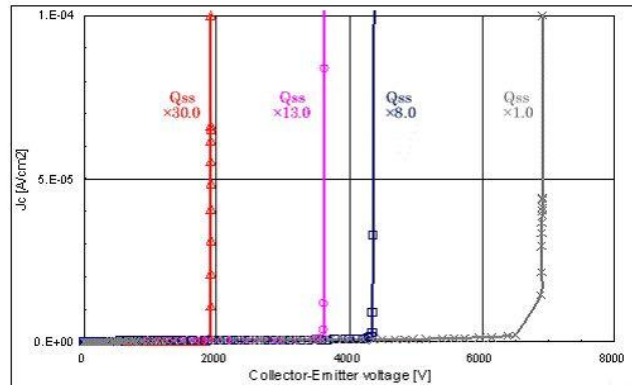


图1：6.5kV IGBT芯片在不同QSS下雪崩击穿电压仿真曲线图
($T_j=25^{\circ}\text{C}$ ，横轴为集电极-发射极电压，竖轴为电流密度)

三菱电机半导体

一般来说，击穿电压会随着 IGBT 芯片边缘电荷量 Q_{ss} 的增加而降低。图 1 为 6.5kV 高压 IGBT 芯片的击穿电压随着 Q_{ss} 变化的曲线图。高湿度工况下的失效机理如下所述。

当给集电极和发射极之间施加电压，高压 IGBT 内部的凝胶会被电极化，芯片的边缘会累积电荷 Q_{ss} ，同时，凝胶中的湿气会加速电荷的集聚，此时，其击穿电压在高湿环境下会下降。所以湿度和电压会加速 IGBT 模块的退化，同时温度也会加速 IGBT 模块的退化。

三菱电机通过采用新的 IGBT 芯片边缘技术 SCC (Surface Charge Control) 提高了高压 IGBT 模块在抵御高湿度方面的鲁棒性。

为了抑制 IGBT 芯片边缘电荷集聚，SCC 技术采用了优化的半绝缘性材料替代传统的绝缘材料，这个半绝缘性层为集聚的载流子提供了通路，如图 3 所示，在高湿工况下，产生的载流子会通过半绝缘层传递出去，避免了电荷的大量集聚。

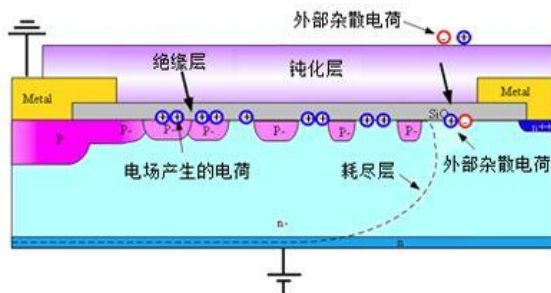


图2：传统IGBT芯片边缘结构

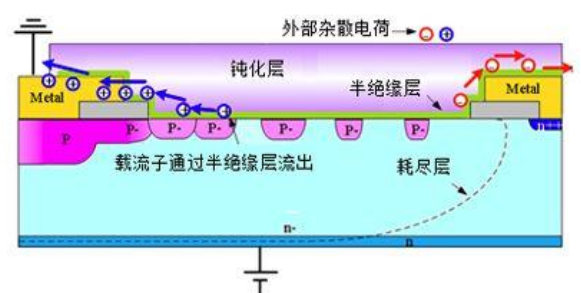


图3：采用SCC技术的IGBT芯片边缘结构

三菱电机半导体

3、湿度影响下的寿命预估模型

C. Zorn 介绍了考虑湿度、温度和电压的加速模型[1]。

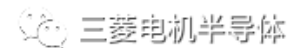
$$\alpha_f(RH, T, V) = \left(\frac{RH_a}{RH_u}\right)^x \cdot \exp\left(\frac{E_A}{k} \cdot \left[\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_a}\right]\right) \cdot \left(\frac{V_a}{V_u}\right)^y$$



公式中， α_f 为测试的加速因子，也就是加速（后缀为 a）测试条件下 MTTF（Mean Time To Failures，平均无故障时间）与参考（后缀为 u）测试条件下 MTTF 之比。 E_A 是活化能，在 0.79eV 和 0.95eV 之间， k 为玻尔兹曼常数。指数 x 为相对湿度的影响，指数 y 为电压的影响，都是经验数据，但是必须通过实际评估来确认。我们把此加速模型扩展到寿命预估模型中。

湿度的寿命模型为：

$$LT = \frac{LT_b}{\pi_H \pi_T \pi_V}$$



湿度加速因子：

$$\pi_H = \left(\frac{RH}{RH_u}\right)^x$$



温度加速因子：

$$\pi_T = \exp\left(\frac{E_A}{k} \cdot \left[\frac{1}{T_u + 273K} - \frac{1}{T + 273K}\right]\right)$$



电压加速因子：

其中：LTb:在参考条件下的基本寿命；

RH[%]：用于寿命计算的外界环境相对湿度；

T[°C]:用于寿命计算的外界环境温度；

V[V]:用于寿命计算的电压；

参考条件下的相对湿度为：RHu=75%。

参考条件下的环境温度为：Tu=25℃。

参考条件下的电压为：Vu=1500V。

相对湿度的经验影响因子为 x 。

电压的经验影响因子为 y 。

活化能 $E_A=0.79\text{eV}$ 。

玻尔兹曼常数 $k=8.62 \times 10^{-5} \text{eV/K}$ 。

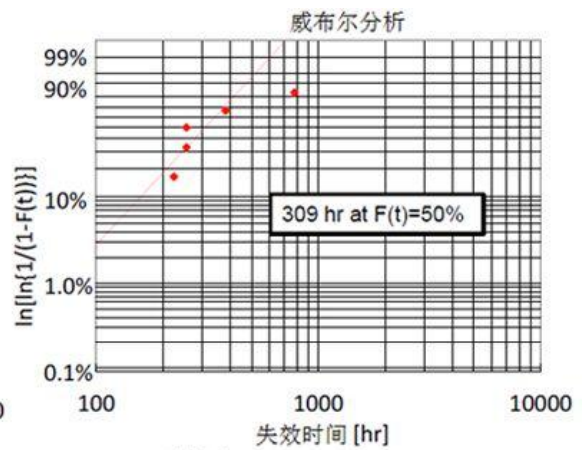
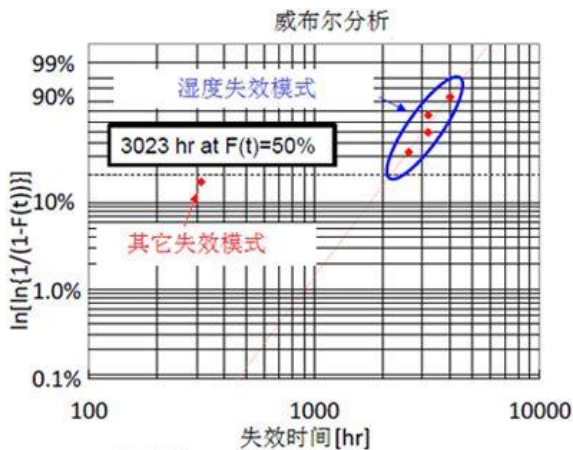
LT 是考虑湿度、温度和电压的预估寿命，公式中的参数，LTb 是参考条件下的基本寿命，与每个高压 IGBT 模块的结构相关，湿度加速因子 π_H ，温度加速因子 π_T ，电压加速因子 π_V ，其它的参数来自加速模型。在此寿命估算模型中，活化能 EA 定义为最小值 0.79eV。同时，参考条件，RHu=75%和 Tu=25℃是东京 8 月份的平均环境条件。除此之外，Vu=1500V 为直流网压。

4、加速因子的估算

4.1 温湿反偏试验测试结果

3.3kV 高压 IGBT 的温湿反偏试验是在以下三个条件下测试：测试条件 A (Ta=85℃，相对湿度=85%，VCE=2800V)，测试条件 B (Ta=85℃，相对湿度=95%，VCE=2800V)，测试条件 C (Ta=85℃，相对湿度=95%，VCE=2000V)，测试结果如图 4，图 5 和图 6 所示。

根据失效机理，湿度引起的失效应该在芯片的边缘区域。试验过程中发生的失效点，同样在芯片的边缘，如图 7 所示。



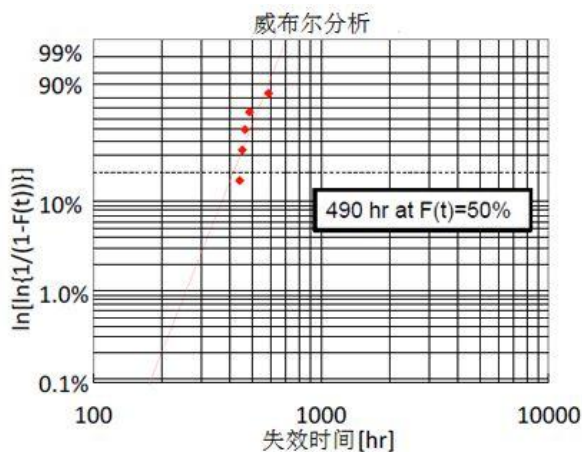


图6：测试条件A：Ta=85°C, RH=85%, VCE=2000V

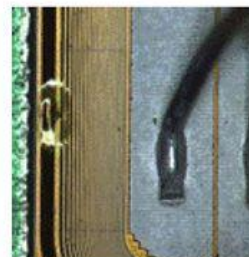


图7：漏电流测试

4.2 湿度加速因子

如图 4 所示，在测试条件 A 的平均寿命为 3023 个小时。同样，如图 5 所示，在测试条件 B 的平均寿命为 309 个小时。所以，从相对湿度 85%到相对湿度 95%，加速因子 α_{f_A-B} 通过计算为 3023/309=9.78。相对湿度的经验影响因子 x 通过下式计算：

$$x = \frac{\ln(\alpha_{f_A-B})}{\ln\left(\frac{RH_{a_testB}}{RH_{a_testA}}\right)}$$

三菱电机半导体

这里 $RHa_testB=95\%$, $RHa_testA=85\%$, 所以上式的计算结果 $x=20.5$ 。

4.3 电压加速因子

如图 5 所示，在测试条件 B 的平均寿命为 309 个小时。同样，如图 6 所示，在测试条件 C 的平均寿命为 490 个小时。所以，从电压 2000V 到电压 2800V，加速因子 α_{f_C-B} 通过计算为 490/309=1.59。电压的经验影响因子 y 通过下式计算：

$$y = \frac{\ln(\alpha_{f_C-B})}{\ln\left(\frac{V_{a_testB}}{V_{a_testC}}\right)}$$

三菱电机半导体

这里 $Va_testB=2800V$, $Va_testC=2000V$, 所以上式的计算结果 $y=1.37$ 。

5. 3.3kV IGBT 寿命预估

5.1 基本寿命时间

这里，参考条件定义为 $RH_u=75\%$ ， $T_u=25^\circ\text{C}$ 和 $V_u=1500\text{V}$ 。通过公式 (1)，可以得到测试条件 A 中的加速因子 αf_A 为 5.31k，测试条件 B 中的加速因子 αf_B 为 52.0k，测试条件 C 中的加速因子 αf_C 为 32.8k。综合这些加速因子，温湿反偏试验测试 A、测试 B 和测试 C 转换为如表 1、表 2 和表 3 所示的参考条件。

表 1：测试条件 A 转换为参考条件

	失效时间
测试条件 A (85°C, 85%RH, 2800V)	315 小时
	2618 小时
	3196 小时
	3203 小时
	3995 小时
参考条件	191 年
	1588 年
	1938 年
	1943 年
	2423 年 (转换值)

表 2：测试条件 B 转换为参考条件

	失效时间
测试条件 B (85°C, 95%RH, 2800V)	224 小时
	255 小时
	255 小时
	382 小时
	780 小时
参考条件	1329 年
	1513 年
	1513 年
	2266 年
	4628 年 (转换值)

表 3：测试条件 C 转换为参考条件

	失效时间
测试条件 C (85°C, 95%RH, 2000V)	439 小时
	451 小时
	464 小时
	485 小时
	588 小时
参考条件	1643 年
	1687 年
	1736 年
	1815 年
	2200 年 (转换值)

以上失效点集成为图 8 所示的威布尔曲线图，从图中可以得到，在参考条件下 $F(t)=10\%$ 的寿命为 1210 年。同时，在此威布尔分析中，排除了最大点和最小点。所以，在参考条件下，3.3kV IGBT 的寿命 $LT_b=1210$ 年。

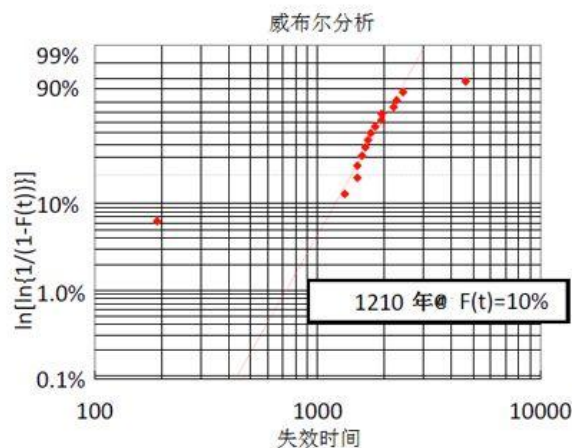


图8：温湿度反偏试验转换为参考条件 (RH=75%、Ta=25℃、VCE=1500V)

三菱电机半导体

5.2 寿命预估模型

所有参数通过温湿度反偏试验 A、试验 B 和试验 C 得到确认。所以新的寿命预估模型如下：

湿度加速因子：

$$\pi_H = \left(\frac{RH}{RH_u}\right)^x$$

三菱电机半导体

温度加速因子：

$$\pi_T = \exp\left(\frac{E_A}{k} \cdot \left[\frac{1}{T_u + 273K} - \frac{1}{T + 273K}\right]\right)$$

三菱电机半导体

电压加速因子：

$$\pi_V = \left(\frac{V}{V_u}\right)^y$$

三菱电机半导体

LT_b=1210 年, T_u=25℃, V_u=1500V, x=20.5, y=1.37, E_A=0.79eV, k=8.62×10⁻⁵ eV/K

新的寿命预估模型仅考虑了湿度引起的失效,但是在实际运行时必须考虑除了湿度以外其它因素引起的失效。

5.3 寿命预估结果

通过以上寿命预估模型,可以预估 3.3kV IGBT 在不同工况下的寿命。图 9 展示了寿命预估结果,包含了在直流 1500V 下 1 年、30 年和 1000 年的温度湿度矫正曲线。通过这些曲线,我们可以看到 3.3kV IGBT 有足够强的抵御湿度能力。

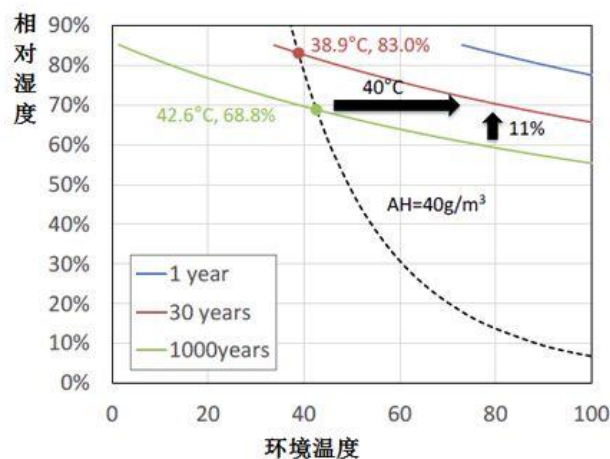


图9：在直流1500V下的寿命预估结果

三菱电机半导体

从上图可以看出，相对湿度增加 11%或者温度增加 40℃，都会造成寿命从 1000 年减为 30 年，所以，相对来说，相对湿度的影响比温度影响更大。一般来说，当变流器内部升温时，绝对湿度会保持不变。如果环境条件从温度 38.9℃、相对湿度 83.0%变为温度 42.6℃、相对湿度 68.8%，但是绝对湿度值保持 40g/m³，寿命会从 30 年增加到 1000 年。所以，预加热是一种非常有效的抑制湿度失效的方法。

当然，1000 年的计算值仅仅是考虑湿度情况下的寿命，如果考虑上其它因素，比如温度循环寿命等，IGBT 模块实际寿命在实际中并没有这么长。

同时，以上寿命预估模型是基于温湿反偏试验，所以没有考虑温度快速变化的情况。特别当快速冷却会造成凝露，比高湿工况更加严酷。在实际工况中，这种温度快速变化的工况也应该考虑。为了防止凝露，同样的，预加热是一种有效的手段。

6. 结论

本文介绍了考虑湿度影响的寿命预估模型。通过这个模型，得到了 1500V 情况下的 1 年、30 年和 1000 年的温度湿度矫正曲线，并且确认了 3.3kV IGBT 模块具有足够的抑制湿度失效的能力。

同时，本文确定了高湿会对高压 IGBT 模块的寿命产生很大的影响，所以如果变流器在高湿工况下时，必须考虑湿度带来的影响。预加热是一种非常有效的抑制湿度失效的方法。

7. 参考文献

- [1]Christian Zorn, Nando Kaminski, “Acceleration of Temperature Humidity Bias(THB) Testing on IGBT Modules by High Bias Levels,” 2015 IEEE
- [2]N. Tanaka, et al., “Robust HVIGBT Modules Design against High Humidity,” PCIM Europe2015
- [3]Shigeto Honda, Tatsuo Harada, Akito Nishii, Ze Chen, Kazuhiro Shimizu, “HighVoltage Device Edge Termination for Wide Temperature Range plus Humidity withSurface Charge Control (SCC) Technology,” ISPSD 2016.

(来源：三菱电机功率器件制作所；**三菱电机（欧洲）有限公司)