

B2M&B3M HTGB-TDDB相关 碳化硅MOSFET可靠性最短板 长期工作可靠性的薄弱点考核

报告人：

2024/09/03

1. 加速可靠性实验定义、适用对象以及实验意义

加速可靠性实验：在高应力条件下测试产品，其目的是在相对短的时间内揭示产品在正常服役条件下可能出现的**失效模式**，并预测这些失效在正常应力条件下的发生概率，估计产品使用寿命的一种实验方法

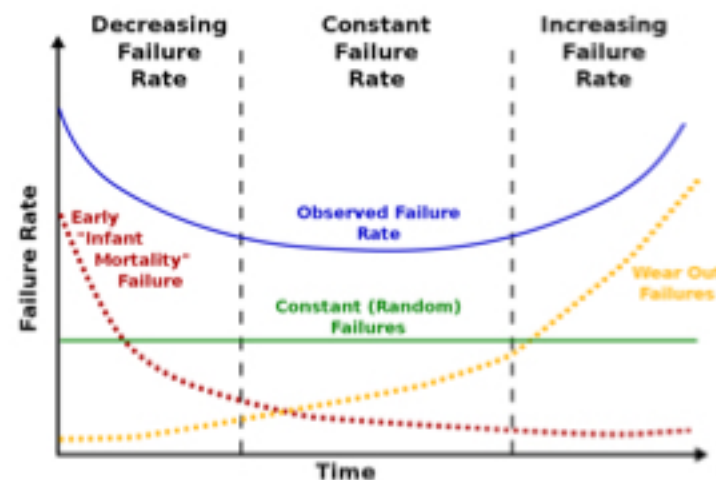
适用对象：研发阶段的产品

产品失效阶段：**早期失效**(失效率随时间降低)，**偶发失效**（失效率为常数），**耗损失效**（失效率随时间增加，系统性失效）

可靠性寿命预测：产品到系统性失效的**可服役时间**

实验意义：缩短研发新产品所需的时间，预测正常服役条件下的产品寿命，加深对器件失效机制的理解，评估器件可靠性

研究方案



2. 可靠性实验方法、条件和参考标准

No.	Stress	Abbr	Conditions	Test duration	Sample Size	Ac/Re	Standard
1	高温反偏 High Temperature Reverse Bias	HTRB	$T_j=175^{\circ}\text{C}$ $V_{DS}=1200\text{V}$	1000 H	77	0/1	MIL-STD-750-1 M1038
2	高温栅偏 (正压) High Temperature Gate Bias (+)	HTGB (+)	$T_j=175^{\circ}\text{C}$ $V_{GS}=22\text{V}$	1000 H	77	0/1	JEDEC JESD22-A-108
3	高温栅偏 (负压) High Temperature Gate Bias (-)	HTGB (-)	$T_j=175^{\circ}\text{C}$ $V_{GS}=-8\text{V}$	1000 H	77	0/1	JEDEC JESD22-A-108
4	高压高湿高温反偏 High Voltage, High Humidity, High Temp. Reverse Bias	HV-H3TRB	$T_a=85^{\circ}\text{C}$ $\text{RH}=85\%$ $V_{DS}=1200\text{V}$	1000 H	77	0/1	JEDEC JESD22-A-101
5	高压蒸煮 Autoclave	AC	$T_a=121^{\circ}\text{C}$ $\text{RH}=100\%$ 15psig	96 H	77	0/1	JEDEC JESD22-A-102
6	温度循环 Temperature Cycling	TC	-55°C to 150°C	1000 cycles	77	0/1	JESD22-A104
7	间歇工作寿命 Intermittent Operational Life	IOL	$\Delta T_j \geq 100^{\circ}\text{C}$ $T_{on}=2\text{min}$ $T_{off}=2\text{min}$	15000 cycles	77	0/1	MIL-STD-750 Method 1037

栅氧可靠性!

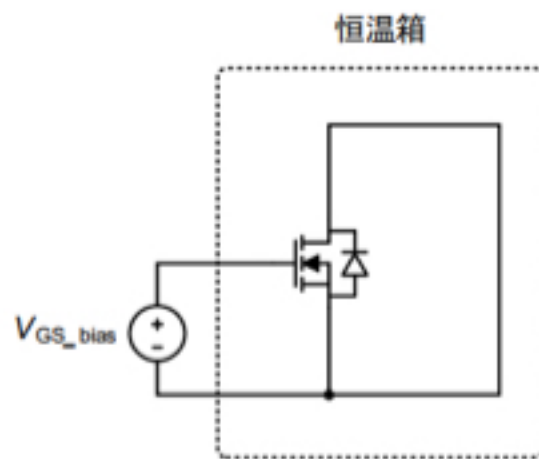
注：除常规HTGB外，我司还对SiC MOSFET器件产品进行高压TDDB（栅氧化层经时击穿）实验

3. HTGB实验原理

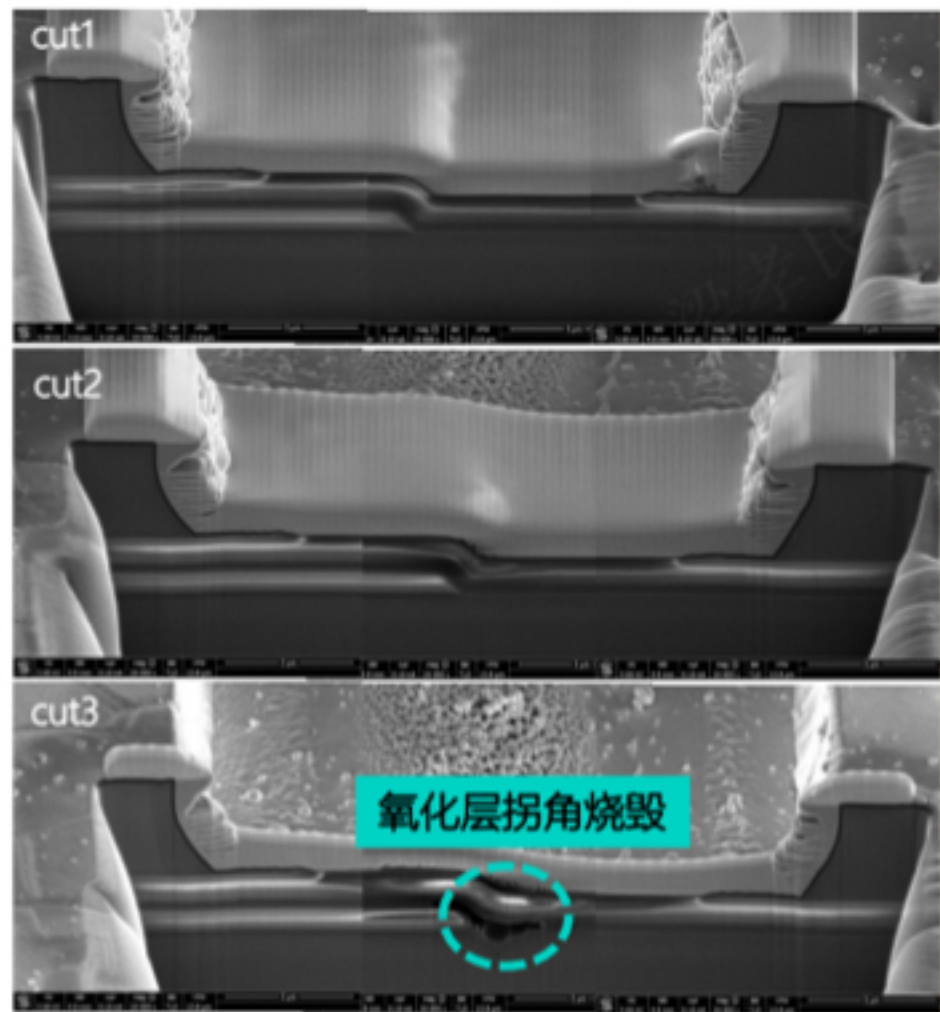
JEDEC的描述: (JESD22-A108G)

4.2.3.4 High Temperature Gate Bias (HTGB)

The HTGB test biases gate or other oxides of the device samples. The devices are normally operated in a static mode at, or near, maximum-rated oxide breakdown voltage levels. The particular bias conditions should be determined to bias the maximum number of gates in the device. The HTGB test is typically used for power devices.



目的: 适用于器件确认有关晶体缺陷的栅极氧化层可靠性, 对评估栅氧化层的稳定性具有重要作用。栅极长时间在高温条件下开启, 或者承受负偏压, 会使阈值电压发生漂移; **氧化层存在可靠性问题的情况下, HTGB会加速老化导致栅极氧化层击穿**



4. TDDDB实验原理

从栅极氧化层失效的**基础原理**角度出发，对器件施加**更高的应力**，探究氧化层的本征失效机理并进行**寿命预测**

TDDDB测试的目的在于分析评估与工作时间相关的介质击穿现象。通过在栅极施加低于SiO₂本征击穿E₀的电压，在此过程，目标器件氧化介质层内会积累一定的缺陷。持续一段时间后将由于SiO₂中的高电场，大电流引起的电荷积累，从而发生击穿。

经时击穿缺陷产生主要模型（栅氧>4nm，适用于SiC）：热化学模型(E模型)；阳极空穴注入模型(1/E模型)

热化学模型(E模型)：该模型认为氧化层经时击穿过程中缺陷产生的主要因素是氧化层电场。施加电应力使Si-O-Si键形成O₃≡Si-Si≡O₃极化分子，在氧化层电场的作用下，Si-Si键不稳定，故O₃≡Si-Si≡O₃极化分子容易坍塌为平面Sp²构型，此过程形成陷阱。当一定数量O₃≡Si-Si≡O₃极化分子发生坍塌后，缺陷不断堆积，氧化层最终发生击穿。

阳极空穴注入模型(1/E模型)：在栅极电场的作用下，电子在强场强下获得能量并在靠近氧化层的阳极界面引起碰撞电离，产生电子和空穴对；碰撞电离产生的空穴在栅极电场的作用下注入氧化层，在受电场作用向阴极运动过程中产生了缺陷。

主要实验方法：

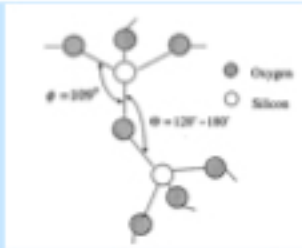
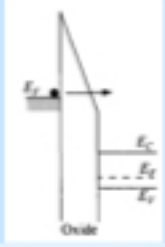
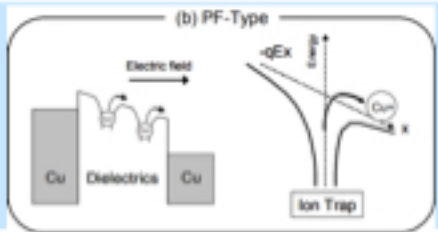
恒压TDDDB：施加接近击穿电压的恒定栅电压来观察栅电流的变化情况。随着TDDDB进行，电流会缓慢减小，直到击穿时发生急剧增加

恒流TDDDB：在栅氧化层上加一恒定电流，测量随时间变化下的电压变化情况。通常，电压会发生缓慢增加，直到击穿时发生急剧减小。

4. TDDDB实验原理

TDDDB中可能的失效模型

详细可参见JEP-194

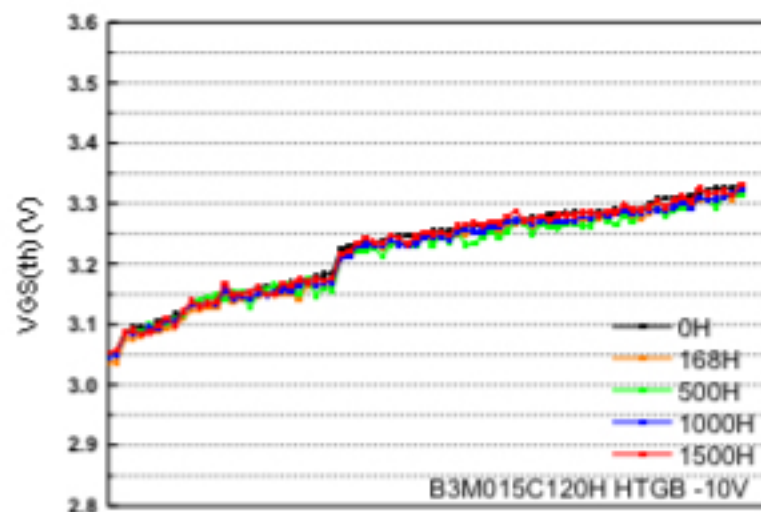
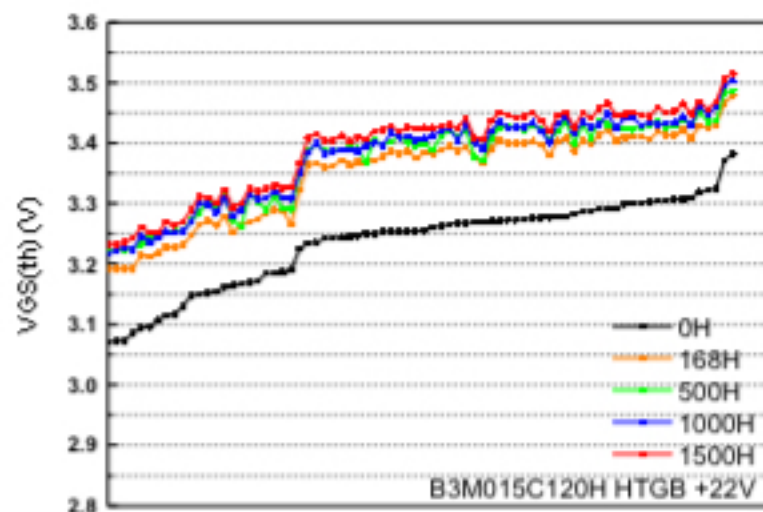
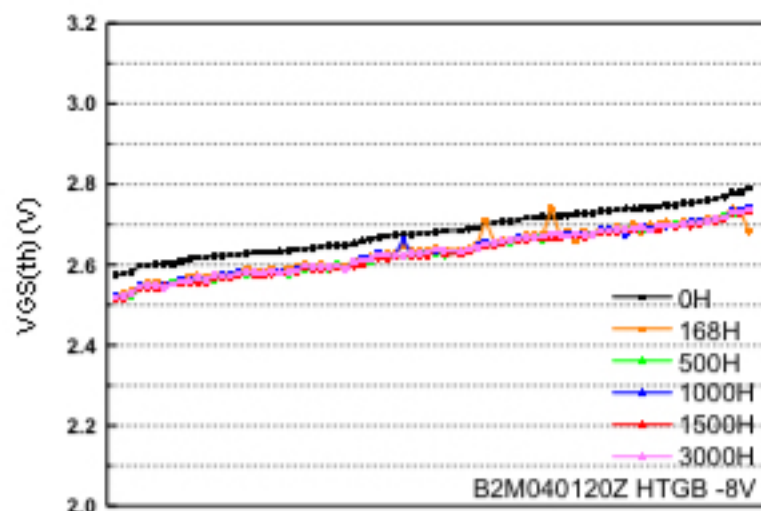
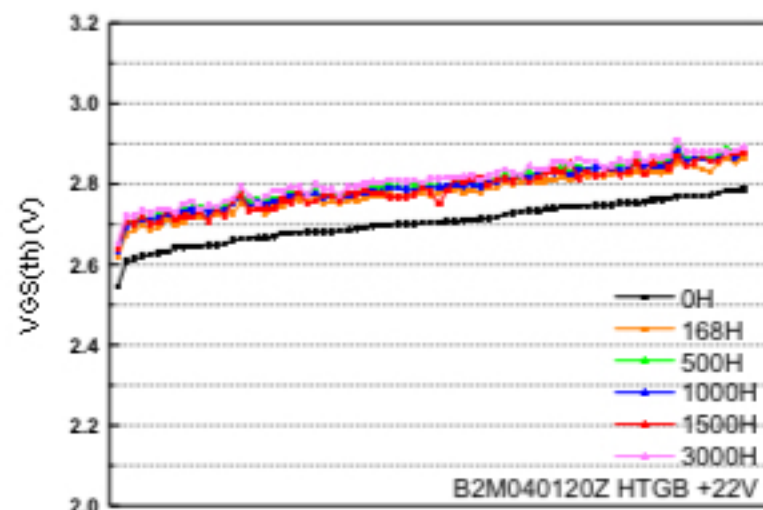
实验类型	适用栅氧	常见失效模型	主要失效驱动力	失效模式
栅氧经时击穿 (TDDDB)	 适用于 栅氧厚度 $T_{OX} \geq 4 \text{ nm}$	E 模型 $TTF = A \cdot \exp(-\gamma \cdot E) \cdot \exp(Ea/kT)$	栅极电场强度, 温度	栅极漏电流瞬时增大 (10倍以上), 栅极氧化层有击穿、烧毁点
	 适用于 栅氧厚度 $T_{OX} \geq 4 \text{ nm}$	1/E 模型 $TTF = \tau \cdot \exp(G(T)/E)$	栅极电场强度, 温度	
	基于大量试验数据得出 适用于栅氧厚度 $T_{OX} \leq 2 \text{ nm}$	Power-law模型 $TTF = A \cdot \exp(-\beta \cdot V) \cdot \exp(Ea/kT)$	栅极电场强度	
		E 1/2 模型 $TTF = A \cdot E^{-1} \cdot \exp(-k \cdot E^{1/2}/T)$	栅极电场强度, 温度	

TDDDB电压可根据栅氧厚度换算为电压,实验电压均超过35V

5. B2M 40mΩ/B3M 15mΩ HTGB&TDDB实验情况

		HTGB		恒压TDDB		
	电压条件	22V	-8V	8MV/cm	8.6MV/cm	9.2MV/cm
B2M 40mΩ	温度条件	恒温温箱175℃				
	试验数量	77	77	25	25	25
	实验情况	3000H Pass	3000H Pass	平均约200H失效	平均约20H失效	平均约2H失效
B3M 15mΩ	试验时间	22V	-10V	无论上一代B2M还是最新的B3M，均能经受短时间的高栅氧电场		
	温度条件	恒温温箱175℃				
	试验数量	77	77			
	失效情况	1500H Pass	1500H Pass			

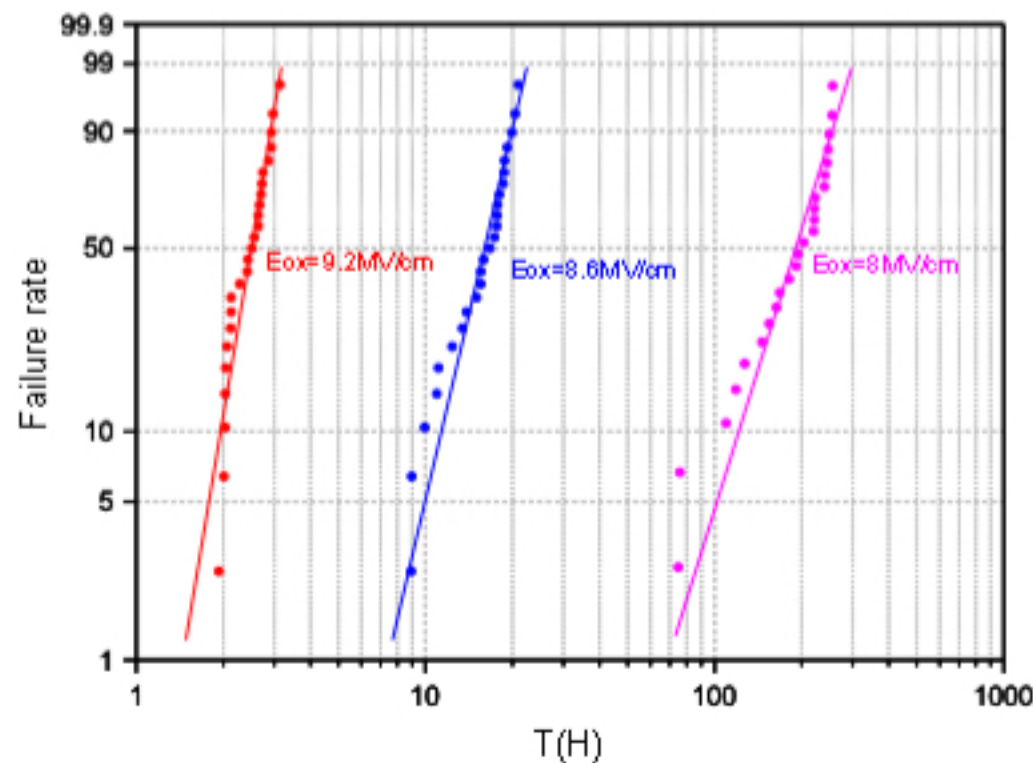
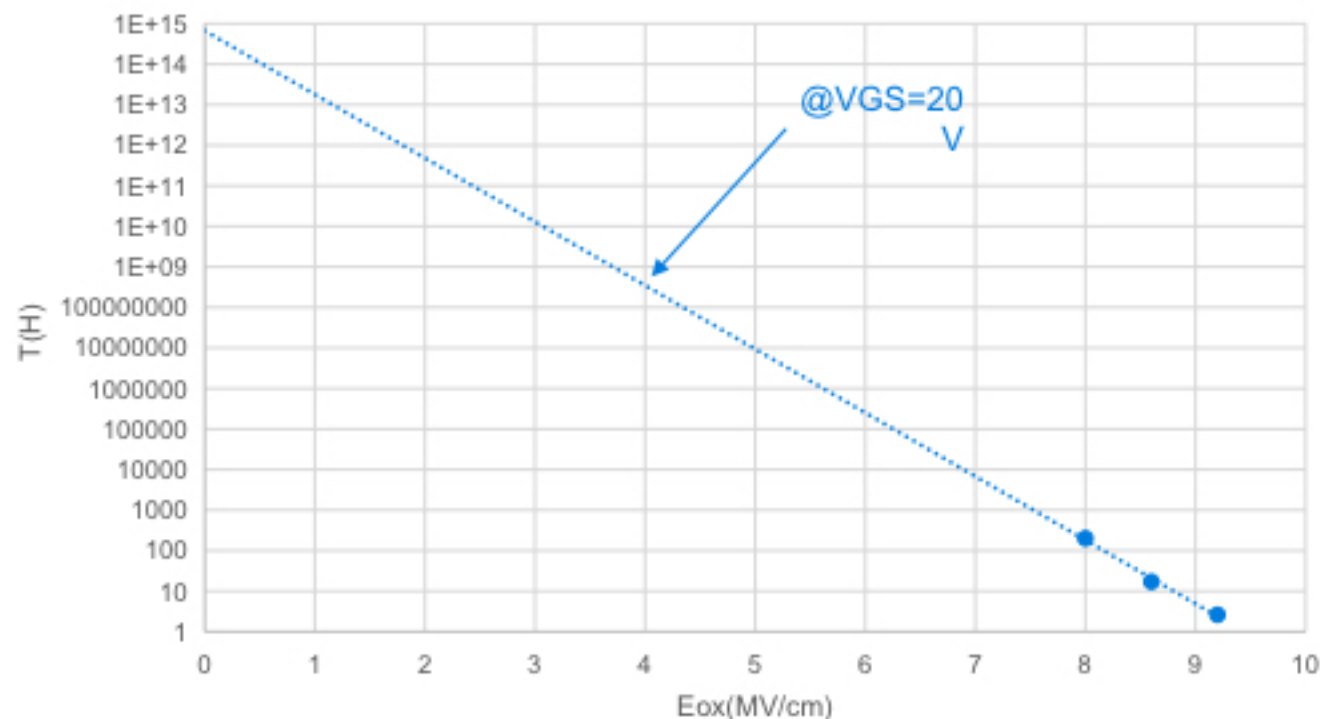
6. B2M040120Z&B3M015C120H HTGB实验结果



B2M经过3000H,B3M经过1500H的HTGB后77颗实验均Pass，无早期失效，HTGB正压Vth漂移在0.2V，负压Vth漂移在0.1V内

7. B2M040120Z TDDDB实验结果

B2M040120Z TDDDB实验结果



只考虑本征（损耗）失效，TDDDB结果显示B2M可在 $V_{GS}=20V$ 下工作超过 $10^8 H$ ， $V_{GS}=15V$ 下超过 $10^9 H$

部分国内竞品为了降低比导通阻（缩小面积）大幅减薄栅氧，栅氧平均工作寿命仅 $10^6 H$ ，大规模应用失效风险高！

8. B2M 结合HTGB&TDDB实验结果进行寿命预测

E model for HTGB (High Temperature Gate Bias)			
TTF (Time to Fail) formula:		$TTF = A_0 * \exp(-\gamma \cdot E_{OX}) * \exp\left(\frac{E_a}{k_B T}\right)$	
Af (Acceleration factor) formula:		$A_f = \exp\left(\gamma \cdot \left(\frac{V_{GSU} - V_{GSOP}}{t_{ox}}\right) + \frac{E_a}{k_B} \cdot \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_t}\right)\right)$	
Settings	说明	#1	Unit
Ea (eV) activation energy	失效激活能(参数)	0.7	eV
Tu (°C) Case temperature in use environment	实际应用的结温	100	°C
Tt (°C) temperature in test environment	可靠性实验温度	175	°C
VGSop (V) Gate voltage in use environment	实际应用栅压	18	V
VGSst (V) Gate voltage in test environment	可靠性实验栅压	22	V
Gate oxide thickness	栅氧厚度	50	nm
Af acceleration factor	加速因子	7219	\
t1 (H) test time	可靠性实验时间	1000	H
t2 (H) operation time	实际应用时间	721879	H

基本半导体碳化硅MOSFET均经过严格的可靠性测试，不会牺牲可靠性过度降低栅氧厚度来降低器件成本。

只考虑本征（损耗）失效，22V 175°C HTGB 1000H可推算为 18V 100°C应用工况下超过720000H

	BASIC	部分国内厂商竞品
栅氧电场	保证工作状态下 <4MV/cm	工作状态下可能 >4MV/cm
HTGB性能	HTGB+ 22V 3000H Pass HTGB- -8V 3000H Pass	HTGB+ 19V Failed
栅氧TDDB寿命@Vguse	> 10 ⁸ H	~10 ⁶ H
理念	牺牲成本保证高可靠性	牺牲可靠性保证低成本

“

BASiC – Vision For A Leading
Innovative SiC Company

”

