

- статические/динамические максимальные значения и характеристики кристаллов IGBT и обратных диодов;
- температурные параметры (включая радиатор);
- параметры напряжения изоляции модуля и все разделения потенциалов;
- пороговые значения цепей защиты;
- входные уровни, выходные параметры и время задержки драйвера;
- механические воздействия и климатические условия.

2.6 Температурная зависимость статических и динамических характеристик силовых модулей

Почти все электрические характеристики IGBT, силовых MOSFET и обратных диодов более или менее зависят от температуры кристалла.

Приведенная таблица отображает тенденции характеристик большинства важных параметров компонентов при повышении температуры (<: растет; <<: растет быстро; >: падает; -: незначительная температурная зависимость). Символы, помеченные значком *, только для PT-IGBT.

Для определения на практике, символы с значком !, которые будут рассмотрены позднее, наиболее важны из-за их особой зависимости от температуры. Что касается температурной зависимости параметров обратных диодов, пожалуйста, смотрите пояснения в разделе 1.3.

Параметр	MOSFET	IGBT	Обр. диод
Напряжение пробоя	<	<	<
Ток запираения, рассеивание мощности при запираении	<	<	<
Сопротивление в открытом состоянии / падение напряжения, рассеивание мощности в открытом состоянии	<<!	<(>>*)!	>
Время включения / рассеиваемая энергия при включении	<	<	-
Время выключения / рассеиваемая энергия при выключении	<	<((<<*)!	<<
Пороговое напряжение	>	>	>
Крутизна характеристики прямой передачи	>	>	-

Для правильной интерпретации справочных данных, их нужно брать учитывая, что много значений для MOSFET и IGBT приведены при температуре корпуса 25 °C и могут быть преобразованы для максимальной рабочей температуры при помощи других приведенных параметров.

Это относится в основном к максимально допустимому току стока или коллектора I_D , I_{DM} , I_C , I_{CM} и максимальной рассеиваемой мощности P_{tot} или P_D , соответственно, которые могут быть уменьшены до значений при реальной работе, как описано в п.3.1.2.

Требуемое уменьшение тока определяется с помощью прямой и обратной рассеиваемой мощности, которая также зависит от температуры, а также из потерь коммутации.

Установлено, что ток и мощность в закрытом состоянии будет расти в 3...6 раз при температуре от 25 °С до 125 °С, но это не играет важной роли, так как рассеиваемая мощность в закрытом состоянии составляет только малую часть общей рассеиваемой мощности.

В отличие от этого, температурная зависимость в открытом состоянии очень важна, и находится отдельно для каждого компонента:

Силовой MOSFET

Рис.2.23 показывает возрастание сопротивления в открытом состоянии $R_{DS(on)}$ силового MOSFET и, как результат, пропорциональное изменение тока стока I_D при высоких температурах, например.

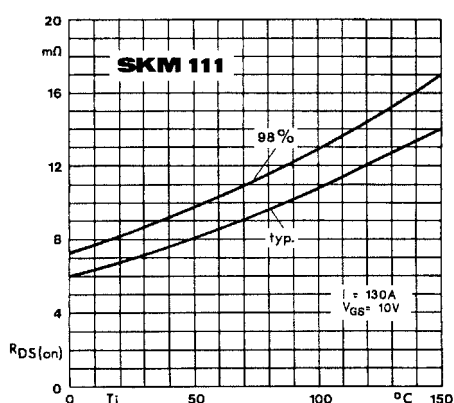


Fig. 5 On-resistance vs. temperature

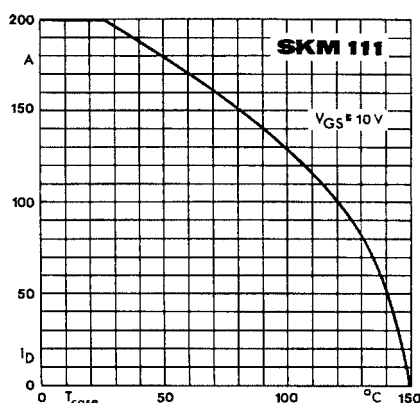


Fig. 6 Rated current vs. temperature

Рис.2.23 Параметры 100 В силового MOSFET в открытом состоянии при изменении температуры; а) сопротивление в открытом состоянии $R_{DS(on)}$; б) тока стока I_D

$R_{DS(on)}$ удваивается в диапазоне температур 25 °С ... 125 °С; и при $T_{case} = 80$ °С только 75 % от максимального тока стока можно использовать даже в статических условиях. С другой стороны, положительный температурный коэффициент падения напряжения в открытом состоянии дает преимущества, такие как упрощенная возможность параллельного включения и высокое удельное сопротивление при жесткой коммутации.

IGBT

Различные концепции IGBT (PT/NPT, см.п.1.2.1) отличаются своими температурными параметрами. Это показано на рис.2.24 с основной характеристикой напряжения насыщения коллектор-эмиттер V_{CEsat} в зависимости от тока коллектора и температуры кристалла.

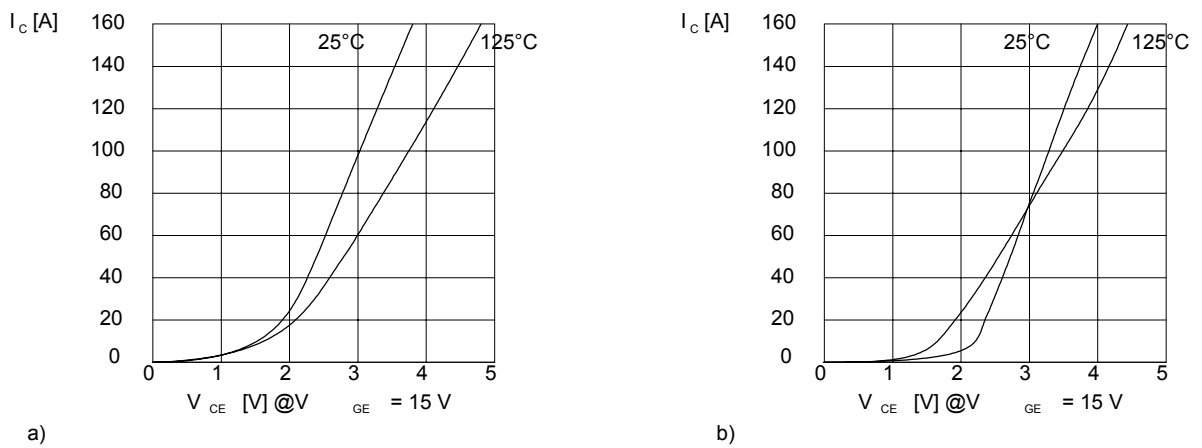


Рис.2.24 Прямые характеристики IGBT: а) SEMITRANS NPT-IGBT 100A@25⁰C; б) PT-IGBT 100A@25⁰C

Температурный коэффициент напряжения насыщения V_{CEsat} NPT-IGBT положительный для любых токов (приблиз. 8 мВ/К при $I_C@25^0C$). Температурный коэффициент напряжения насыщения V_{CEsat} PT-IGBT, однако, отрицательный для реально используемых прямых токов и растет до нуля только при приближении к номинальному току. В результате, NPT-IGBT по сравнению с PT-IGBT имеет большую рассеиваемую мощность с одной стороны, и лучшую симметрию тока с другой (равномерное распространение тепла/ выносливость, возможность не выборочного параллельного включения).

Характеристики изменения тока коллектора от температуры аналогичны рис.2.22б, и обычно приведены в справочных данных.

Как уже было упомянуто, время коммутации и потери при коммутации MOSFET и IGBT также будут возрастать с увеличением температуры. Но поскольку некоторые измерения «горячих» кристаллов все равно могут быть выполнены на практике, большинство значений в данном справочнике приведены при 125⁰C.

По этой причине можно назвать другое различие между NPT-IGBT и PT-IGBT (рис.2.25, см.п.1.2.1 и 1.2.3)

Хвостовой ток I_t , возникающий при выключении, будет возрастать вместе с температурой. В то время как хвостовой ток NPT-IGBT вырастет почти на 100 % при 125⁰C по сравнению с 25⁰C (рис.2.25а), хвостовой ток PT-IGBT (рис.2.25б)вырастет почти в три раза в этом диапазоне температур. Поэтому в NPT-IGBT безусловно меньше потери коммутации при больших температурах, чем в PT-IGBT.

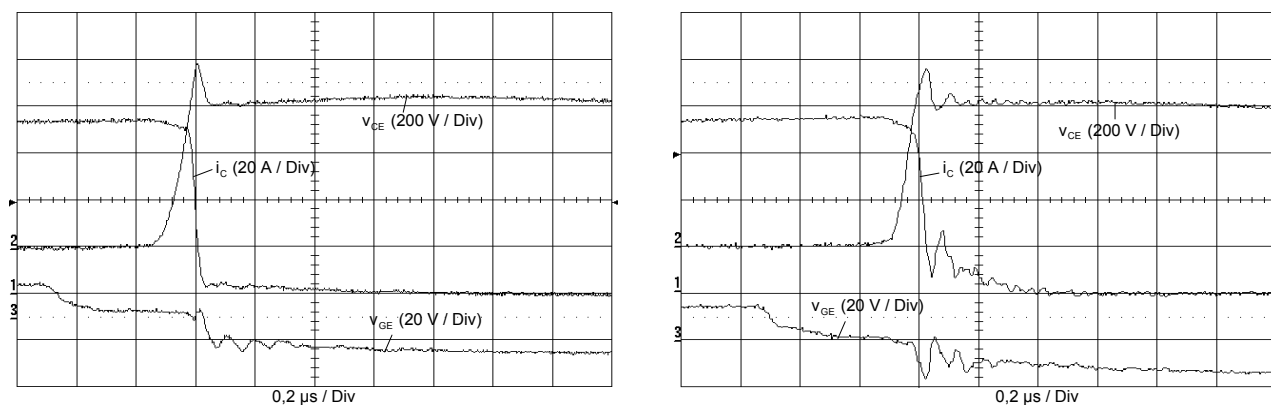


Рис.2.25 Выключение IGBT: а) SEMITRANS NPT-IGBT; б) PT-IGBT

Меньшая зависимость от температуры у порогового напряжения и крутизны характеристики прямой передачи, и на практике при коммутации не значительна. Но это основное ограничение при аналоговой работе силовых модулей.

2.7 Надежность

Надежность, или соответствие характеристик определенный период времени, одно из наиболее важных параметров качества силовых модулей.

С одной стороны, у силовых модулей высокая электрическая и температурная отдача; с другой стороны, преждевременный выход из строя может вызвать опасную поломку. Надежность очень сложно выразить при относительно малой партии, чаще встречается срок службы (10...30 а) и технические требования при сложных тестах, но ее можно найти из

- точного управления всеми воздействиями в процессе производства (надежность при изготовлении),
- тест на надежность в условиях, приближенным к реальным для получения причин отказов;
- испытания компонентов внутри системы и управление большинством важных параметров. [231]

Далее приведены некоторые из выбранных тестов силовых модулей без излишних подробностей по обширной системе обеспечения качества EN ISO 9001, по которой SEMIKRON дает 2-х летнюю TQM гарантию на все свои силовые полупроводники.

Были проведены следующие стандартные тесты для выпуска и оценки качества MOSFET и IGBT модулей, а также отдельные, специфичные тесты на надежность:

Тест	Стандарт	Условия теста
Закрывающее напряжение при высокой температуре (HTRB) Воздействие на нагретый затвор	DIN 41749, IEC 147-4	1000 ч. V_{DSmax} , V_{CEmax} , T_{jmax}
	DIN 45930, CECC 50000-4, 5.2	1000 ч. V_{DSmax} , V_{CEmax} , T_{jmax}

Хранение при высокой температуре	DIN 45930, CECC 50000-4, 4.3	1000 ч. T_{stgmax}
Хранение при низкой температуре		1000 ч. T_{stgmin}
Запирание при высокой влажности и температуре	DIN 45930, CECC 50000-4, 4.3	1000 ч. 85°C , 85% относит. влажн.
Циклическое изменение температуры	DIN IEC 68-2-14-test Na	$V_{DS}, V_{CE} = 0.8V_{CEmax}, V_{Dsmax} \leq 80\text{ В}$
Циклическое изменение мощности	DIN 41749, IEC 147-4	100 темп. циклов T_{stgmax} / T_{stgmin}
Температура пайки	DIN IEC 68-2-20-test Tb	20000 циклов, $\Delta T_j = 100\text{ К}$
Припаяемость	DIN IEC 68-2-20-test Ta	$260 \pm 5^{\circ}\text{C}$, $10 \pm 1\text{ с}$
Вибрации / ускорение	в соотв. с DIN IEC 68-2-6-test Fc	$235 \pm 5^{\circ}\text{C}$, старение 3
		5 g

Действительные следующие критерии неисправностей в соответствии со стандартом MIL-STD-19500:

Ток утечки затвор-сток- / затвор-эмиттер I_{GSS}, I_{GES} :	$> \pm 20\text{ нА}$ или $> 100\%$ от первоначального значения
Ток стока при нулевом напряжении на затворе или ток отсечки коллектор-эмиттер I_{DSS}, I_{CES} :	$> \pm 100\text{ мкА}$ или $> 100\%$ от первоначального значения
Сопротивление / падение напряжения в открытом состоянии R_{Dson}, V_{CEsat} :	$> 120\%$ от первоначального значения
Максимальное изменение порогового напряжения $V_{GS(th)}, V_{GE(th)}$:	$> \pm 20\%$ от первоначального значения
Температурное сопротивление переход-корпус R_{thjc} :	$> 120\%$ от первоначального значения
Напряжение изоляции V_{isol} :	$<$ установленного макс. значения

На рис.2.26 и рис.2.27 показаны примеры измерительных процессов: измерительные схемы и процессы циркуляции температуры и мощности.

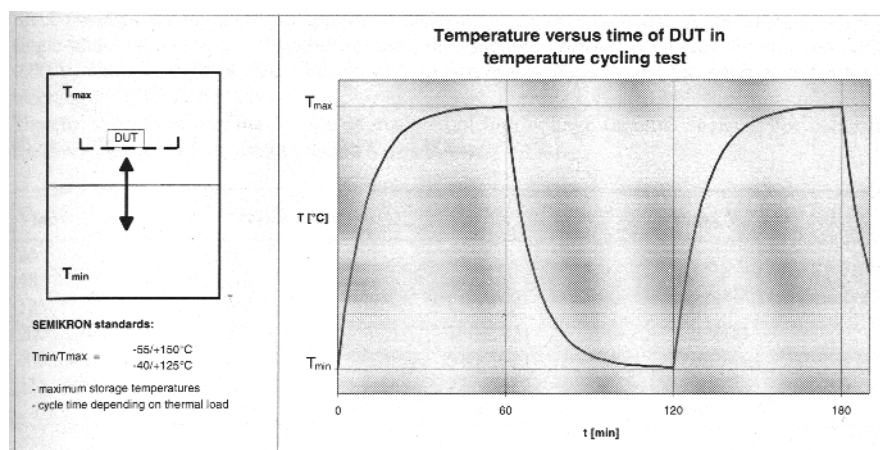


Рис.2.26 Циркуляция температуры: измерительная схема и процесс измерения

Основные характеристики надежности силовых модулей могут быть проверены с помощью тестов на циркуляцию мощности и температуры, см. также п.1.4.2.4. следовательно, эти тесты играют важную роль при оценке качества модулей.

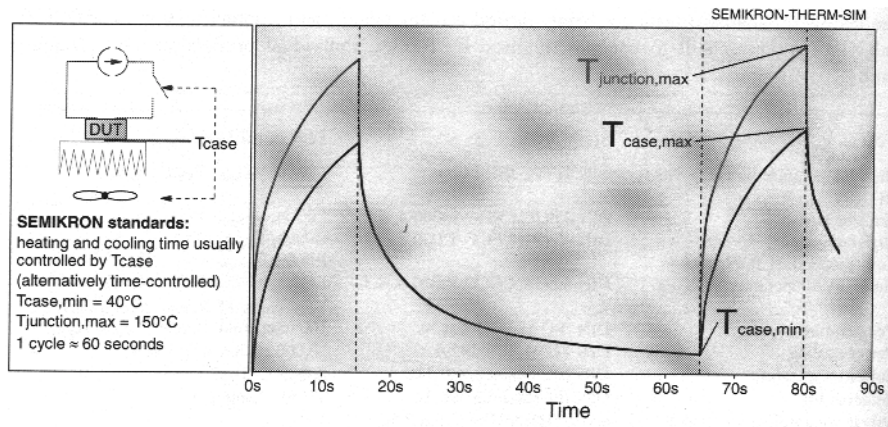


Рис.2.27 Циркуляция мощности: измерительная схема и процесс измерения