

Тепловое повреждение полупроводниковых приборов в блокирующем состоянии

Эффект теплового повреждения известен практически с самого начала развития полупроводниковых технологий. Классическим примером теплового повреждения является случай, когда прикладываемое к прибору напряжение становится причиной возникновения токов утечки, которые, в свою очередь, нагревают прибор. Чем горячее прибор, тем больше токи утечки. Эта зависимость имеет экспоненциальный характер. Если охлаждение не соответствует такому стремительному нагреву, температура прибора будет увеличиваться и, в конце концов, он выйдет из строя.

**Рафаэль Шнелль
(Raffael Schnell)
Нандо Камински
(Nando Kaminski)**

**Перевод:
Алексей Чекмарев**

chekmarev@fmccrustel.ru

Введение

Последние разработки высоковольтных IGBT-модулей характеризуются повышенными значениями энергии, рассеиваемой в выключенном состоянии вследствие высоких значений блокирующего напряжения — несмотря на то, что токи утечки остались на том же уровне, что и для приборов с более низким блокирующим напряжением. Это может вызвать определенные проблемы при определении характеристик таких приборов в условиях работы при высоких температурах (например, 125 °С). Дело в том, что в этом случае вся рассматриваемая система (основание, модуль, чип) нагревается до неизменной температуры и поэтому не имеет температурного градиента, позволяющего уменьшить генерируемое тепло. Эта ситуация полностью противоположна условиям реальной эксплуатации, при которой температура перехода действительно может достигнуть максимального значения 125 °С, но температура корпуса никогда не превысит, например, 110 °С, что позволяет тепловой энергии, выделяемой при наличии токов утечки, рассеиваться благодаря имеющемуся температурному градиенту между переходом и корпусом.

В данной статье обсуждаются пределы тепловой стабильности, которые необходимо принимать во внимание при испытаниях и эксплуатации полупроводниковых приборов. В целях упрощения анализа сделан ряд допущений. Поэтому нужно отметить, что, в отличие от принятого в статье допущения, нагревание и охлаждение обычно не являются равномерными процессами, поэтому после расчетов всегда необходимо делать некоторый разумный запас. Однако вычисление этих значений помогает разрабатывать требования к охлаждению приборов.

Описание проблемы

Энергия P_{heat} , рассеиваемая прибором, — это произведение прикладываемого напряжения V_0 и тока утечки $I(V_0, T_j)$ при данном напряжении и соответствующей температуре перехода T_j . Обычно выражение для энергии содержит температурную зависимость тока утечки. Для расчетов используется следующая известная формула, учитывающая тот факт, что ток утечки удваивается приблизительно каждые 11 К. Ток I_0 — это ток утечки при прикладываемом напряжении V_0 и соответствующей температуре T_0 :

$$P_{heat} = V_0 \times I(V_0, T_j) = V_0 \times I_0 \times 2^{\frac{T_j - T_0}{\Delta T_d}} \quad (1)$$

Энергия P_{cool} отводимая от прибора, определяется разницей между температурой перехода T_j и установившейся заданной температурой T_0 (например, окружающей среды), а также тепловым сопротивлением R_{th} :

$$P_{cool} = \frac{T_j - T_0}{R_{th}} \quad (2)$$

Примечание: переходные эффекты могут не учитываться, так как R_{th} уже дается для самых неблагоприятных условий.

На рисунке показаны генерируемая (P_{heat}) и отводимая энергия (P_{cool}) в зависимости от температуры перехода. Заданная температура для этого примера $T_0 = 125$ °С. Для примера взят IGBT-модуль NiPak АВВ на 6500 В с током утечки 60 мА при 3600 В и 125 °С. Кривая красного цвета получена для P_{heat} . Отведенная энергия показана для различных значений теплового сопротивления. Синий график пред-

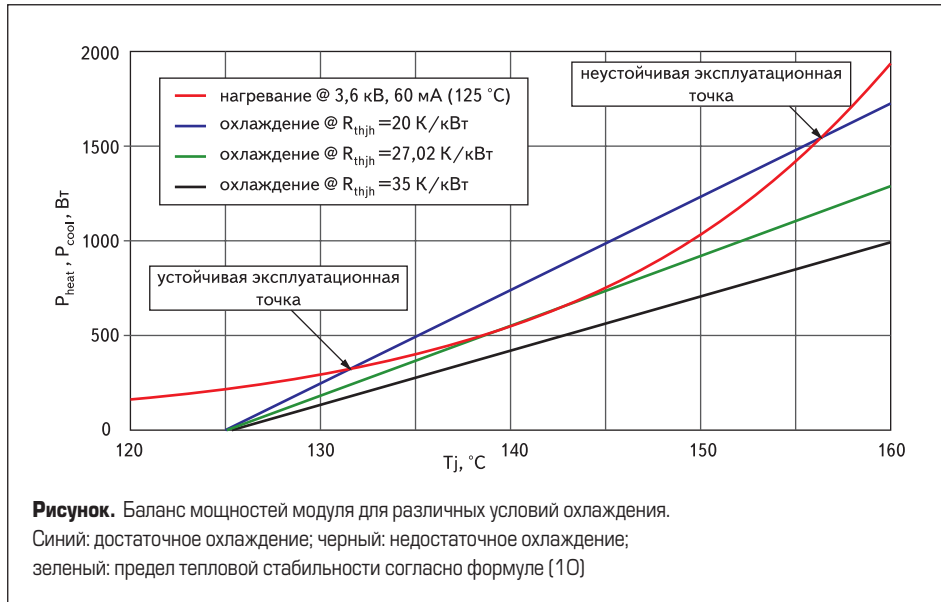


Рисунок. Баланс мощностей модуля для различных условий охлаждения. Синий: достаточное охлаждение; черный: недостаточное охлаждение; зеленый: предел тепловой стабильности согласно формуле (10)

ставляет модуль с достаточным охлаждением. Черный график характеризует модуль, установленный с нарушением технологии, а зависимость зеленого цвета определяет предел тепловой стабильности. Анализ синего графика на рисунке говорит о том, что до первой точки пересечения (устойчивая эксплуатационная точка) чипы будут нагреваться до достижения баланса мощностей (примерно 131,5 °C). Выше этой точки температура перехода падает обратно до устойчивой эксплуатационной точки. Однако если температура перехода превысит 156,6 °C (неустойчивая эксплуатационная точка), баланс мощностей нарушается, и прибор продолжает нагреваться до повреждения. Линия черного цвета — это энергия, отводимая в случае неправильного применения охлаждения (например, модуль не прикручен к охладителю). В таких условиях P_{heat} всегда выше, чем P_{cool} , и это означает, что устойчивая эксплуатационная точка не может быть достигнута. В результате произойдет тепловое повреждение прибора. Зеленая линия определяет энергию, которую необходимо отвести от прибора, чтобы достичь предела термической стабильности. В том случае, если P_{heat} и P_{cool} являются тангенциальными, стабильная и нестабильная точки совпадают. Очевидно, что малейший тепловой дисбаланс может спровоцировать тепловое повреждение.

Расчет критерия стабильности

Как уже указывалось, пределом тепловой стабильности является точка, при которой зависимости P_{heat} и P_{cool} тангенциальны. В этой точке энергия нагрева P_{heat} и энергия охлаждения P_{cool} должны быть равны, также должны быть равны производные обеих кривых (относительно температуры перехода):

$$P_{heat} = P_{cool} \wedge \frac{dP_{heat}}{dT_j} = \frac{dP_{cool}}{dT_j}. \quad (3)$$

Производная функции нагрева дана в виде, который удобно представить как исходную функцию, умноженную на константу.

$$\frac{dP_{heat}}{dT_j} = V_0 \times I_0 \times 2^{\frac{T_0 - T_j}{T_d}} \times \frac{\ln 2}{\Delta T_d} = P_{heat} \frac{\ln 2}{\Delta T_d}. \quad (4)$$

Производная функции охлаждения — это величина, обратная тепловому сопротивлению:

$$\frac{dP_{cool}}{dT_j} = \frac{1}{R_{th}}. \quad (5)$$

Преобразуя правую часть выражения (3), можно получить формулу для P_{heat} , которая зависит только от T_d и R_{th} . Подставляя этот результат в левую часть выражения (3), определяем критическую температуру, при которой две кривые тангенциальны.

$$\begin{aligned} \frac{dT_{heat}}{dT_j} &= \frac{dT_{cool}}{dT_j} \Rightarrow P_{heat} \frac{\ln 2}{\Delta T_d} = \\ &= \frac{1}{R_{th}} \Leftrightarrow P_{heat} = \frac{\Delta T_d}{R_{th} \times \ln 2}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} P_{heat} = P_{cool} &\Rightarrow \frac{\Delta T_d}{R_{th} \times \ln 2} = \\ &= \frac{T_{j,crit} - T_0}{R_{th}} \Leftrightarrow T_{j,crit} - T_0 = \frac{\Delta T_d}{\ln 2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Интересно, что разница между критической температурой перехода $T_{j,crit}$ и заданной температурой T_0 не зависит от прикладываемого напряжения V_0 , тока утечки I_0 и теплового сопротивления R_{th} ! Влияющими факторами являются параметры (ΔT_d и основание 2), характеризующие температурную зависимость тока утечки. Используя эти результаты, можно рассчитать соответствующий ток утечки при $T_{j,crit}$:

$$\begin{aligned} I_{crit} &= I(V_0, T_{j,crit}) = I_0 \times 2^{\left(\frac{1}{T_d} \times \frac{\Delta T_d}{\ln 2}\right)} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow I_{crit} = e \times I_0. \end{aligned} \quad (8)$$

Кроме того, если результат формулы (7) подставить в правую часть выражения (3), могут быть определены соотношения других параметров для этого критического режима:

$$\begin{aligned} \frac{dP_{heat}}{dT_j} &= \frac{dP_{cool}}{dT_j} \Rightarrow V_0 \times I_0 \times 2^{\left(\frac{1}{T_d} \times \frac{\Delta T_d}{\ln 2}\right)} \times \frac{\ln 2}{\Delta T_d} = \\ &= \frac{1}{R_{th}} \Leftrightarrow V_0 \times I_0 \times e \times \frac{\ln 2}{\Delta T_d} = \frac{1}{R_{th}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Окончательно критерий стабильности определяется следующим образом:

$$V_0 \times I_0 \times R_{th} < \frac{\Delta T_d}{e \times \ln 2}. \quad (10)$$

Для $\Delta T = 11$ К:

$$\frac{\Delta T_d}{e \times \ln 2} = 5,8 \text{ К}. \quad (11)$$

Заключение

Выражение (10) представляет собой упрощенный критерий стабильности. Левая часть содержит основные влияющие факторы: прикладываемое напряжение V_0 , ток утечки I_0 при заданной температуре, V_0 и тепловое сопротивление, — в то время как правая часть относится к элементарной физике и имеет значение 5,8 К для кремниевых приборов ($\Delta T_d = 11$ К). В любом случае, это правило должно проверяться вследствие неординарного воздействия тока утечки и внутренних свойств прибора, которые могут значительно изменить температурную зависимость. Однако рекомендуется иметь дополнительный запас, поскольку для упрощения расчетов было принято, что охлаждение и ток утечки однородны по всему прибору, а это нереально в повседневной эксплуатации. Пример рисунка показывает, что можно использовать прибор на охладителе при напряжении $V_0 = 3600$ В и температуре 125 °C в случае, если переходное сопротивление между корпусом и охладителем будет на самом низком, но достаточном уровне. Однако нужно принять во внимание, что в этом случае температура перехода уже установилась значительно выше значения 125 °C, что оказывает влияние на характеристики переключений и область безопасной работы.

Чтобы характеризовать прибор при температуре перехода $T_{vj} = 125$ °C, необходимо выполнить два действия:

- приложить напряжение V_0 до начала испытаний (например, за несколько сотен микросекунд) и снять напряжение V_0 сразу после окончания испытаний;
- откорректировать охладитель по отношению к пониженной температуре, чтобы скомпенсировать падение температуры на тепловом сопротивлении, вызванное ожидаемыми потерями тока утечки.

В любом случае, важно знать значение наименьшего допустимого теплового сопротивления. Поэтому обязательно нужно устанавливать модуль на охладитель путем затяжки всех болтов с надлежащим усилием. Кроме этого, необходимо использовать термопроводящую смазку или хотя бы фольгу для снижения теплового сопротивления интерфейса между корпусом и охладителем и приведения его к номинальным значениям.

Материал подготовлен с согласия компании ABB Switzerland Ltd. Semiconductors.