

# 600 / 1200-вольтовые IGBT: новый стандарт производительности в устройствах с высокой скоростью переключения

Быстродействующие IGBT третьего поколения (H3), предлагаемые компанией Infineon Technologies для класса напряжений 600 и 1200 В, оптимизированы для высокоскоростного переключения в таких устройствах, как сварочные аппараты, источники бесперебойного питания, импульсные источники питания и преобразователи солнечной энергии. Новые приборы демонстрируют оптимальные динамические характеристики, плавное переключение и заметное снижение потерь. Они предоставляют разработчикам экономически эффективное решение, отвечающее современным жестким требованиям к энергоэффективности, и упрощают разработку систем, сокращая затраты на охлаждение и фильтрацию.

Дэвид ЧИОЛА (Davide CHIOLA)  
Холгер ХЮСКЕН (Holger HÜSKEN)

## Введение

Стандарты высокой энергоэффективности, устанавливаемые правительственными органами, и необходимость снижения стоимости систем — вот главные движущие силы, стимулирующие разработку более эффективных силовых ключей [1]. Выбор правильного ключа (способного обеспечить приложению оптимальное соотношение цена/производительность) зависит от уровня мощности и режима нагрузки. IGBT, которые отличаются более высокой плотностью тока и более плавным переключением по срав-

нению с MOSFET, обычно используются в устройствах с высоким уровнем мощности (>1 кВт), низкими частотами переключения (<40 кГц), а также в условиях, когда нагрузка и питание изменяются в небольших пределах. Типичные области применения — электроприводы с «жестким» переключением, источники бесперебойного питания (UPS) и сварочные аппараты.

В последние годы благодаря современным технологическим достижениям и потребностям новых рынков появился широкий спектр специализированных приложений для IGBT, расширяющий сферу их приме-

нения: маломощные драйверы, индукционные нагреватели и импульсные источники питания — для потребительского рынка, преобразователи энергии солнца и ветра — для рынка возобновляемых источников энергии.

## Технология и семейство продукции

Новые семейства IGBT HighSpeed 3-го поколения с максимальным напряжением 600 и 1200 В представляют собой расширение популярных семейств продукции TrenchStop и изготавливаются на базе той же технологии [2, 3] (рис. 1).

Хорошо известно, что данная технология IGBT (особенностью которой является оригинальная топология ячеек и наличие вертикального канала) позволяет изменять параметры прибора путем воздействия плазменными методами на дрейфовую область прибора. Регулируя усиление внутреннего *p-n-p*-транзистора в IGBT, можно менять проводимость в дрейфовой области и, следовательно, напряжение насыщения ( $V_{CEsat}$ ) и потери на выключение ( $E_{off}$ ). Это позволяет сбалансировать потери на проводимость и потери на переключение. Приборы HighSpeed 3-го поколения, как и все представители семейства TrenchStop, устойчивы к короткому замыканию, имеют высокую нагрузочную способность по импульсному току и плавные характеристики переключения, что обеспечивает снижение уровня электромагнитных помех.

Для тех устройств, где требуется обратная проводимость, в IGBT 3-го поколения встраиваются диоды EmitterControlled (EmCon)

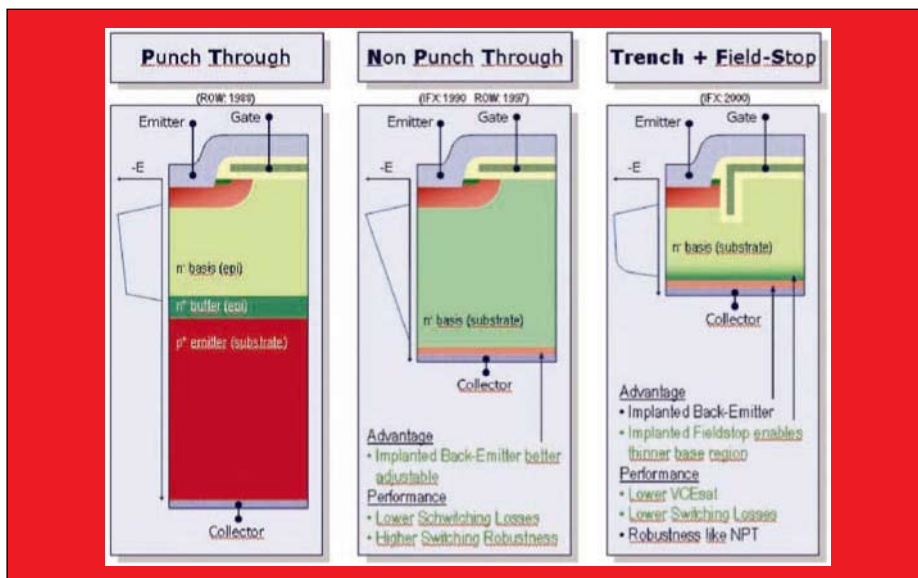


Рис. 1. Сравнение различных технологий IGBT

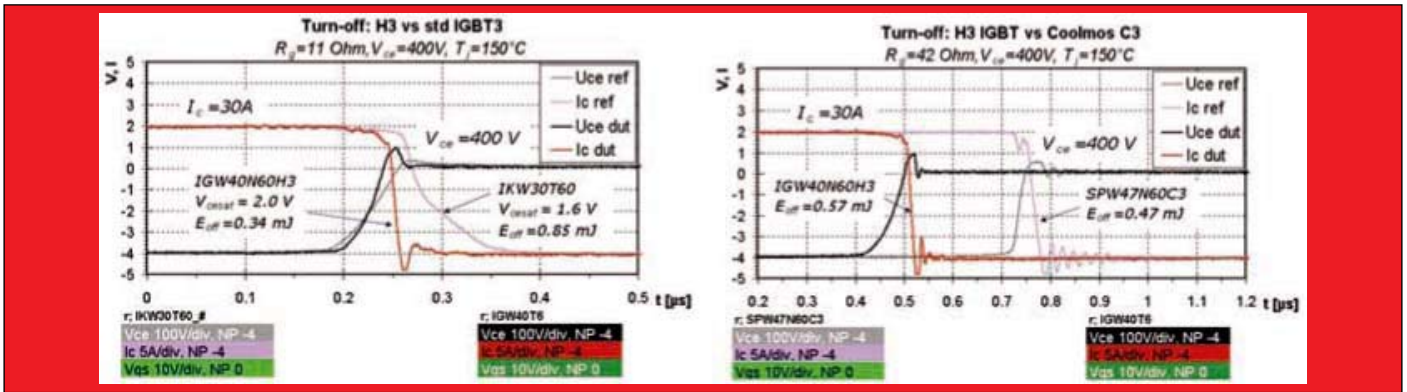


Рис. 2. Характеристики переключения 600-вольтовых H3 IGBT по сравнению со стандартными приборами: а) TrenchStop; б) Coolmos C3

последнего поколения. Анализ показывает, что в готовых устройствах имеет место однонаправленный перенос энергии, или, другими словами, коэффициент мощности таких устройств всегда положителен и более того — близок к 1. Это позволяет оптимизировать размеры диода и дополнительно повысить эффективность системы за счет снижения потерь как диода, так и IGBT.

**Динамические характеристики**

Характеристики переключения 600-В и 1200-В приборов были измерены в широком диапазоне температур, токов переключения и сопротивлений затвора. В качестве примера приведены результаты сравнения для приборов 600-В класса: новых H3 IGBT и транзисторов TrenchStop и Coolmos C3, имеющих аналогичный номинальный ток, в полумостовой испытательной схеме переключения с индуктивной нагрузкой (для всех приборов в качестве диода использовался SiC-диод Шоттки Infineon, номинальный ток 8 А).

На осциллограммах тока явно видно, что хвостовой ток при высокой температуре у прибора H3 IGBT полностью отсутствует (рис. 2а), а по характеристикам при выключении он аналогичен униполярному быстродействующему прибору, такому как Coolmos C3 (рис. 2б). Потери на выключение на 60% ниже, чем у стандартных TrenchStop IGBT3, а напряжение насыщения на 25% выше.

В условиях данного теста H3 IGBT с номинальным током 40 А демонстрирует более быстрое изменение тока  $di/dt$  при выключении, чем 30-А Coolmos C3 (2080 против 1000 А/мкс, рис. 2), и при этом сохраняет плавные характеристики переключения и умеренный выброс напряжения, составляющий 100 В. Однако потери на выключение (Eoff) Coolmos C3 ниже на 17% за счет более резкого нарастания напряжения.

На диаграмме Vcesat/Eoff (рис. 3) приведены результаты сравнения с образцом конкурирующей продукции. Потери на выключение измерены при значении тока, составляющем половину от номинального, что соответствует типичным условиям эксплуатации, и нормализованы по току, чтобы учесть различные размеры кристалла испытывавшихся приборов.

Продукция H3 по характеристикам существенно превосходит предыдущее поколение быстродействующих приборов Infineon (серия HS). На диаграмме видно, что ком-

бинированная структура Trench + Field Stop обеспечивает превосходный баланс по сравнению с альтернативными технологиями.

1200-вольтовые приборы также демонстрируют улучшенные характеристики относительно предыдущего поколения: потери на выключение на 40% ниже, а напряжение насыщения Vcesat на 400 мВ выше, чем у 1200-В TrenchStop2. Для иллюстрации влияния встречно-параллельного диода на характеристики переключения IGBT производились измерения при включении 40-А H3 IGBT ( $T_j = 175^\circ\text{C}$ ,  $V_{ce} = 800\text{ В}$ ,  $I_c = 15\text{ А}$ ) соответственно с 15-А, 40-А диодами EmCon 4-го поколения и с 15-А SiC-диодом Шоттки (рис. 4).

Диод оказывает существенное влияние на потери при включении IGBT: для топологий с жестким переключением, предназначенных для достижения максимальной эффективности, например в преобразователях солнечной энергии, наилучшим выбором будет SiC-диод Шоттки. Однако в большинстве готовых устройств оптимизированный EmCon-диод 4-го поколения обеспечивает лучшее соотношение цена/производительность, и поэтому он был выбран для интеграции с H3 IGBT.

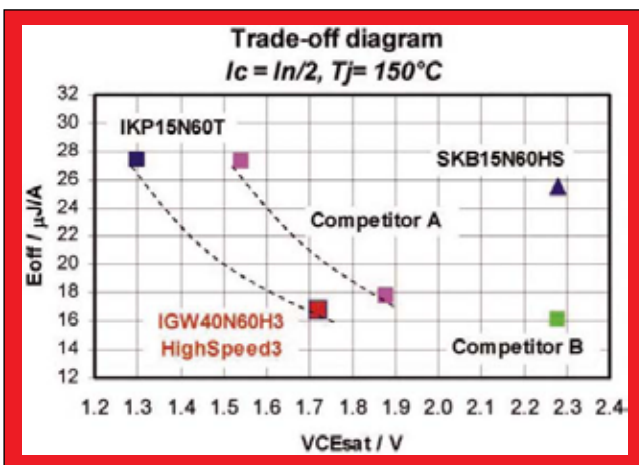


Рис. 3. Оценка нормализованных потерь на выключение 600-вольтовых IGBT в зависимости от напряжения насыщения коллектор–эмиттер Vcesat при токе, составляющем 50% от номинального значения

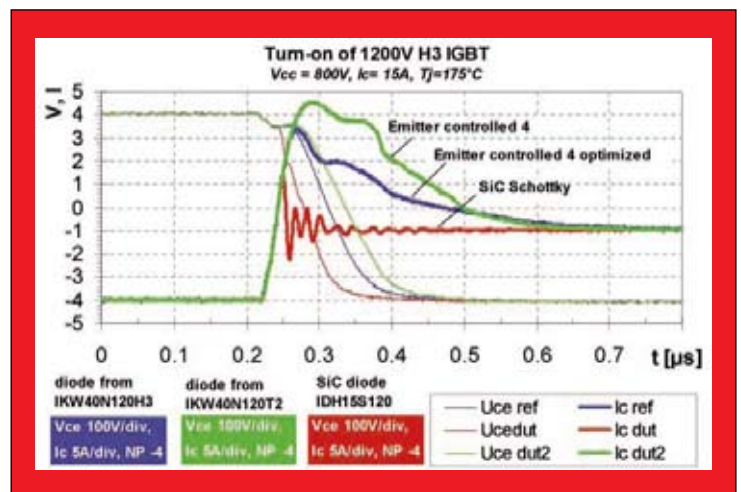


Рис. 4. Влияние различных диодов на характеристики включения 1200-В H3 IGBT

## Анализ применения

Для оценки характеристик 600-вольтовых High Speed3 IGBT при работе в устройствах с быстрым переключением, были проведены испытания 20-А и 30-А приборов с использованием тестовой платы PFC (1 кВт, выходное напряжение 400 В, входное напряжение от 110 до 230 В в режиме непрерывных токов (ССМ)). НЗ IGBT сравнивались с Coolmos C3 и другими обычными (не-Superjunction) приборами MOSFET. На рис. 5 показана плата PFC (коррекция коэффициента мощности) для внутрисхемного тестирования.

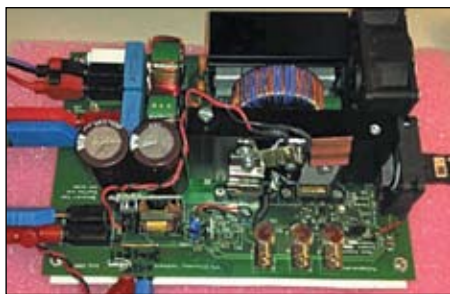


Рис. 5. Плата PFC для внутрисхемного тестирования

Лучший в своем классе 70-Ом прибор Coolmos C3 в корпусе TO247 показал наилучшую эффективность при высоком токе нагрузки и мощности более 600 Вт. НЗ IGBT в корпусе TO220 явно превосходит традиционные MOSFET в гораздо более крупных корпусах при меньшей площади кристалла (от 1/7 до 1/10). По сравнению с 160-Ом Coolmos C3 прибор НЗ IGBT компактнее (более чем вдвое); тем не менее, при мощности свыше 850 Вт он превосходит конкурента по плотности мощности, явно демонстрируя преимущества технологии изготовления быстродействующих IGBT и экономическую эффективность решения для схем коррекции коэффициента мощности в диапазоне выше 1 кВт (например, импульсные источники пи-

тания для телекоммуникационного оборудования).

Чтобы продемонстрировать преимущества нового семейства 1200-вольтовой продукции третьего поколения при работе в составе реального устройства, рассмотрим случай жесткого переключения инвертора мостового типа. Эта топология используется, например, в 1-ли 3-фазных выходных каскадах UPS или инверторов солнечных батарей. В любом случае необходимо преобразовать напряжение шины постоянного тока в синусоидальный сигнал. При ШИМ-управлении потери каждого ключа могут быть рассчитаны непосредственно с использованием программы IPOSIM [4]. На рис. 6 продемонстрировано резкое уменьшение потерь инвертора, позволяющего получить 50 Гц, 40 А (rms) из 600 В постоянного тока.

Значение коэффициента мощности  $\cos\phi$  (где  $\phi$  — фазовый угол между током и напряжением) изменялось от 0,85 до 1. Температура перехода кристалла для всех приборов принималась равной 125 °С. (Заметим, что для продукции Infineon максимальная температура перехода на 50 °С выше этого значения, тогда как для большинства конкурирующих приборов — только на 25 °С.) Потери IKW40N120H3 на 10% ниже по сравнению с лучшим образцом конкурирующей продукции с тем же номинальным током; повышение эффективности заметно уже при умеренных частотах переключения (20 кГц), причем вклад в этот процесс вносят и IGBT, и диод.

На рис. 7 еще раз показано, насколько важен правильный выбор диода. Здесь представлены потери для комбинации 40-А НЗ IGBT с полноразмерным диодом (IKW40N120T2), с оптимизированным диодом (IKW40N120H3) и с SiC-диодом (IDH15S120) при следующих условиях:  $T_j = 175$  °С,  $V_{dc} = 800$  В, 20 кГц, 40 А (rms),  $\cos\phi = 0,85$ ,  $m = 0,9$ . Использование SiC-диода снижает потери на переключение IGBT на 20%, при этом потери на пере-

ключение самого диода практически отсутствуют, в результате общее снижение потерь составляет 25%.

## Заключение

В статье рассмотрены быстродействующие IGBT 3-го поколения (НЗ) компании Infineon Technologies для класса напряжений 600 и 1200 В, оптимизированные для применения в устройствах с высокой скоростью переключения, таких как сварочные аппараты, источники бесперебойного питания (UPS), импульсные источники питания и преобразователи солнечной энергии. Детально проанализированы их электрические и тепловые параметры на основе результатов экспериментальных измерений и внутрисхемного тестирования в готовых устройствах.

## Литература

1. Примеры нормативов различных организаций в области энергосбережения (по состоянию на 8 марта 2010 г.): Energy Star (<http://www.energystar.gov>); 80plus (<http://www.80plus.org>); CECP (проект КНР по энергосбережению, <http://www.cecp.org.cn>)
2. Laska T., Münzer M., Pfirsch F., Schaeffer C., Schmidt T. The Field Stop IGBT: a new Power Device Concept with a Great Improvement Potential (Field Stop IGBT: новая концепция силовых приборов с огромным потенциалом для усовершенствования) // Труды IASPSD, 2000.
3. Rütting H., Umbach F., Hellmund O., Kanschat P., Schmidt G. 600V-IGBT3: Trench Field Stop Technology in 70 mΩ Ultra Thin Wafer Technology (600-В IGBT3: технология Trench Field Stop и технология 70-Ом сверхтонких пластин) // Труды IASPSD, 2003.
4. IPOSIM — инструментальное средство компании Infineon для внутреннего моделирования силовых схем: <http://web.transim.com/Infineon-IPOSIM>

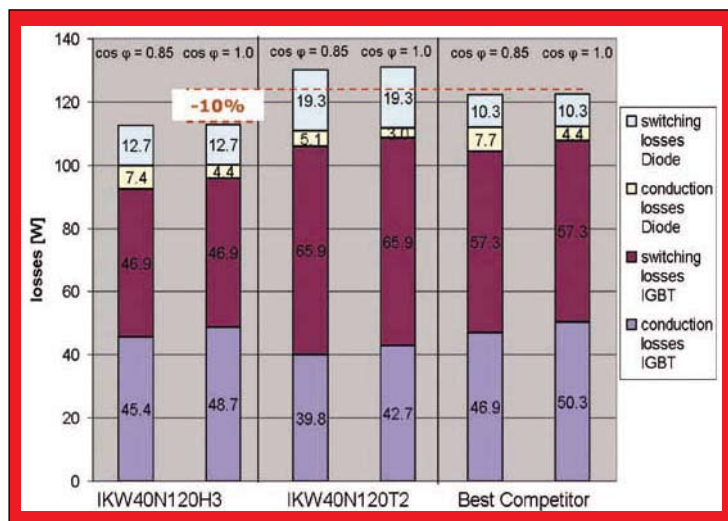


Рис. 6. Сравнение потерь в инверторе на частоте 20 кГц

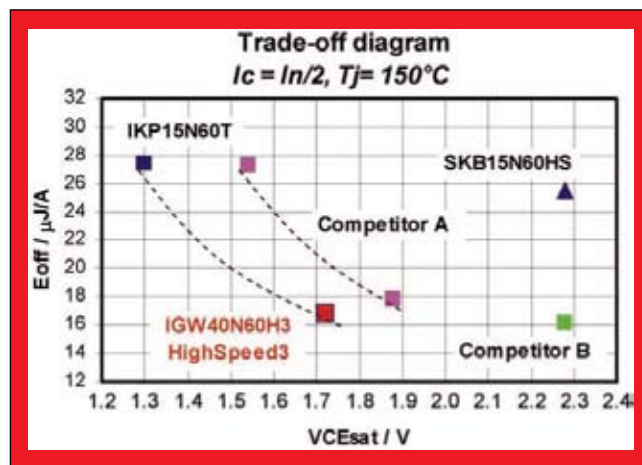


Рис. 7. Сравнительные характеристики переключения при использовании кремниевого (Si) и карбид-кремниевого (SiC) диода в инверторах с коэффициентом мощности 0,85 для IGBT и для диода