

# 4,5-кВ IGBT и диоды для электроэнергетики

**Томас Шютце**  
(Thomas Schütze)

Для построения систем передачи энергии, действующих на постоянном токе и при высоком напряжении, создано новое поколение кристаллов IGBT и диодов с рабочим напряжением 4,5 кВ. Эти приборы оптимизированы для функционирования с низкими статическими потерями в сочетании с быстрым включением при коммутации больших токов и напряжений. В кристаллах реализована высокая надежность в режимах короткого замыкания благодаря применению технологии HDR при производстве IGBT и диодов. Семейство на напряжение 4,5 кВ дополняет уже существующую линейку семейств высоковольтных IGBT-модулей на напряжение 3,3 и 6,5 кВ. IGBT-модули будут выпускаться в двух различных корпусах.



Рис. 1. Корпус 4,5-кВ модуля FZ1200R45HL3

Первое исполнение — модуль в высокоизолированном корпусе (изначально разработанной для 6,5-кВ IGBT) имеет напряжение изоляции 10,2 кВ и соответствующие крепежные зазоры, необходимые для транспортных применений, работающих в тяжелых условиях эксплуатации при подаче постоянного напряжения на вход преобразователя в диапазоне 2500–3000 В.

Для второго исполнения — корпус IHV-B, который является преемником известного и широко применяемого в мире конструктива IHV-A, также разработаны модифицированные кристаллы IGBT и диодов. Модули в корпусах IHV-B ориентированы на промышленные применения, в том числе приводы переменного тока на напряжения до 10 кВ, вставки постоянного тока (HVDC), системы FACTS. Внешний вид модуля показан на рис. 1.

В будущих HVDC-системах предпочтение планируется отдавать преобразователям напряжения на базе IGBT-модулей вместо систем на основе тиристорных преобразователей. Решения с использованием IGBT-модулей позволяют реализовывать независимые алгоритмы управления активным и реактивным током благодаря тому, что IGBT является ключом, управляемым как по включению, так и по выключению. Кроме того, такие решения показывают отличные характеристики при авариях сетей переменного тока.

Для высоковольтных схем необходимо применение большого числа последовательно соеди-

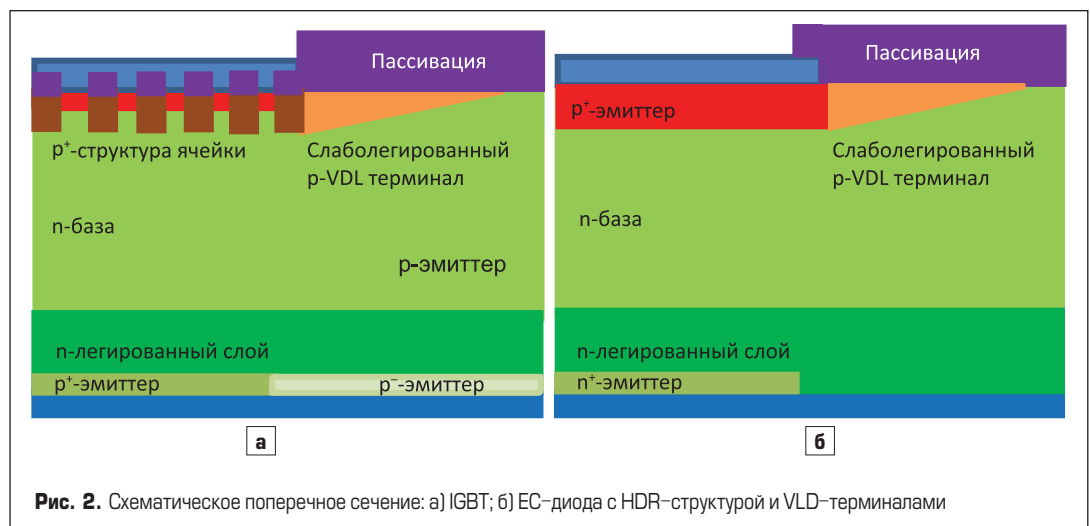


Рис. 2. Схематическое поперечное сечение: а) IGBT; б) EC-диода с HDR-структурой и VLD-терминалами

ненных полупроводниковых приборов, при этом требуется синхронизированное высокоточное управление всеми ключами. Для решения задачи построения многоуровневого преобразователя напряжения для высоковольтных схем для HVDC и FACTS был разработан модульный многоуровневый преобразователь MMC (Modular Multilevel Converter). В HVDC-схеме частота коммутации отдельных IGBT-модулей может быть низкой, поэтому для уменьшения общих потерь отдается предпочтение ключам с малыми статическими потерями.

### Структура IGBT и диода

Trench-технология IGBT обеспечивает низкие статические потери за счет эффекта накопления заряда между ячейками вместе с оптимизированной структурой ячеек и оптимизированной длиной и шириной канала, что необходимо для поддержания высокого блокирующего напряжения. В результате Trench-технология предлагает реальный способ влиять на концентрацию носителей заряда ячейки в более широком диапазоне, чем стандартная планарная технология.

На рис. 2 показано схематическое поперечное сечение структуры 4,5-кВ IGBT и диода.

### Электрические характеристики

#### Статические характеристики

Для достижения низкого напряжения в открытом состоянии IGBT с рабочим напряжением 4,5 кВ была использована известная Trench-технология от полупроводниковой структуры 6,5 кВ. Был использован соответствующий базовый материал, адаптированный блокирующий слой и оптимизированная структура ячейки, что в результате позволило получить лучшие в своем классе статические характеристики для 4,5-кВ приборов. При номинальном токе 1200 А (модуль FZ1200R45HL3) было достигнуто типовое значение  $V_{CE(sat)} = 2,35$  В при температуре кристалла 25 °С,  $V_{CE(sat)} = 2,9$  В при температуре кристалла 125 °С и  $V_{CE(sat)} = 3,0$  В при температуре кристалла 150 °С. ЕС-диод обладает почти нулевым температурным коэффициентом при номинальном токе 1200 А и типовым значением прямого падения напряжения в открытом состоянии  $V_f \leq 2,5$  В в диапазоне температур 25 °С  $\leq T \leq 150$  °С.

#### Динамические характеристики

Осциллограммы коммутации токов и напряжений в нормальных условиях, то есть при  $V_{CE} = 2,8$  кВ,  $I_C = 1200$  А и  $T = 150$  °С, показаны на рис. 3. На осциллограммах можно увидеть, что коммутация токов и напряжений в таких условиях при паразитной индуктивности в цепи питания на уровне 150 нГн является мягкой. Величина  $V_{CE}$  не превышает 3,4 кВ. Мягкое выключение обеспечивается и в более суровых режимах — при больших паразитных индуктивностях, больших токах и рабочей температуре до -40 °С. Типовые осцил-

лограммы сигналов включения и обратного восстановления также показаны на рисунке. Они демонстрируют очень гладкий градиент хвостового тока  $I_F$ .

#### Коммутация

##### при высоком токе и напряжении

При возникновении аварийных ситуаций в системах передачи электроэнергии на постоянном токе уделяется большое

внимание вопросу мгновенного включения IGBT в режимах больших токов и высокого напряжения. Поэтому была проведена оценка надежности полупроводниковых приборов в данных условиях эксплуатации за пределами области безопасной работы (RBSOA).

Среди прочих характеристик ширина канала IGBT является одним из параметров, позволяющих адаптировать поведение транзистора при включении таким образом, чтобы сделать его предсказуемым в случае отказа. Увеличение ширины канала способствует повышению скорости включения. В то же время, однако, расширенный канал обладает худшей стойкостью к короткому замыканию из-за увеличения тока КЗ. Следовательно, необходимо найти компромисс между характеристиками включения и устойчивостью к короткому замыканию. Выполнить оба требования разрешает применение IGBT с вертикальной структурой.

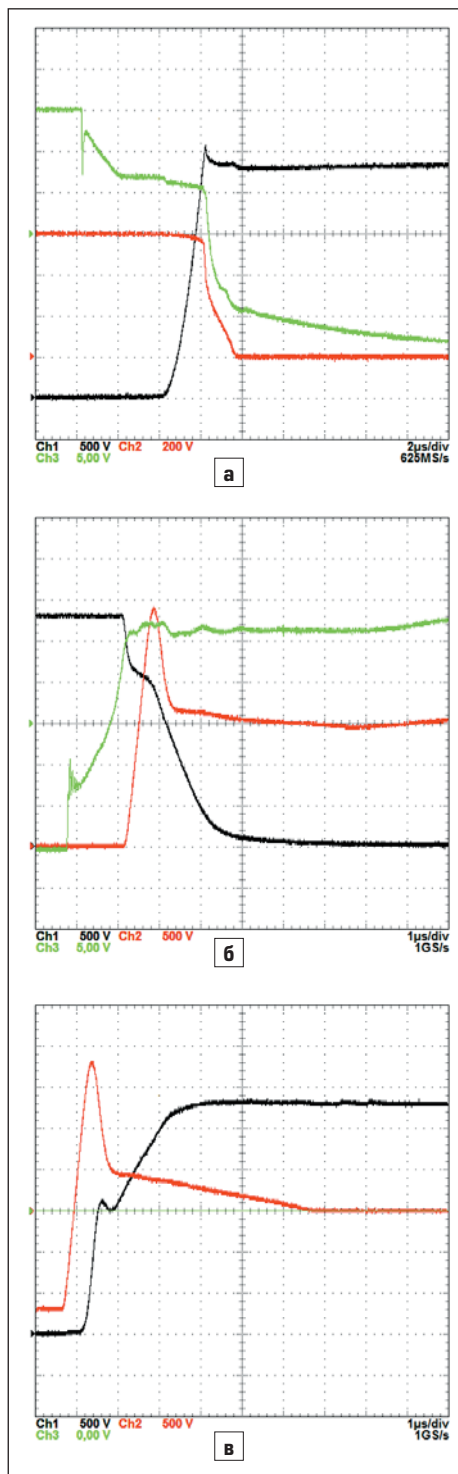
#### Стойкость к короткому замыканию

Для того чтобы доказать устойчивость IGBT к короткому замыканию 1-го типа, были проведены испытания в жестких условиях эксплуатации:  $V_{CE} = 3000$  В,  $V_{GE} = 17$  В и  $T = 125$  °С. При этом коммутируемый ток через силовой модуль достигал 9500 А, что почти в 8 раз выше номинального значения.

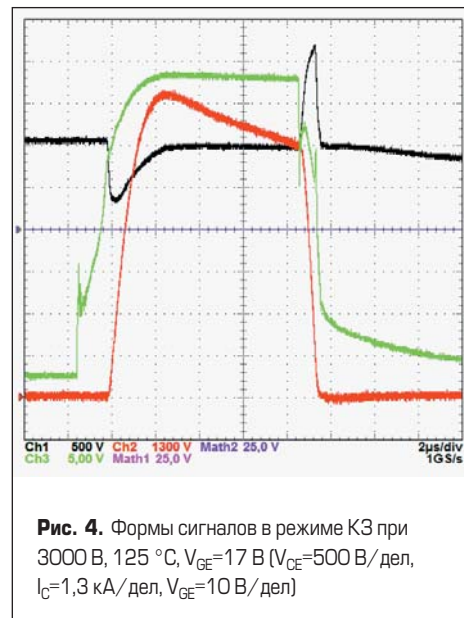
Вертикальная структура IGBT была оптимизирована с целью увеличения максимально допустимого времени КЗ. На рис. 4 показаны осциллограммы токов и напряжений в режиме короткого замыкания. IGBT-модуль FZ1200R45HL3 может справиться с режимом КЗ и гарантированно быть выключен даже после КЗ длительностью 10 мкс.

#### Надежность IGBT и диода

При проектировании преобразователей, как для электроэнергетики, так и тяговых приводов, большое внимание уделяется



**Рис. 3.** Типовые формы сигналов при 2800 В/1200 А, 150 мкГн, 150 °С: а) выключение:  $V_{CE} = 400$  В/дел,  $I_C = 150$  А/дел,  $R_{goff} = 5,1$  Ом,  $V_{GE} = 5$  В/дел; б) включение:  $V_{CE} = 350$  В/дел,  $I_C = 300$  А/дел,  $R_{gon} = 1,2$  Ом,  $V_{GE} = 5$  В/дел; в) обратное восстановление:  $V_{CE} = 500$  В/дел,  $I_C = 500$  А/дел,  $R_{gon} = 1,2$  Ом



**Рис. 4.** Формы сигналов в режиме КЗ при 3000 В, 125 °С,  $V_{GE} = 17$  В ( $V_{CE} = 500$  В/дел,  $I_C = 1,3$  кА/дел,  $V_{GE} = 10$  В/дел)

способности IGBT и диодов работать в условиях высокой перегрузки по току отключения, что позволяет повысить надежность системы в целом. Применение технологии HDR предоставляет возможность снизить влияние структуры выводов на надежность IGBT. Ограничивающим фактором при этом остается только конструкция ячейки. Trench-структура обеспечивает дальнейшее уменьшение длины истока IGBT. Благодаря тому что плотность тока убывает обратно пропорционально длине истока, удается эффективно повысить стойкость к защелкиванию Trench-IGBT и достичь высокой надежности при выключении. Это подтверждается испытаниями в режиме переключения пятикратного номинального тока, при котором отсутствуют большие осцилляции тока и напряжения.

Кроме малого значения прямого падения напряжения, для нового 4,5-кВ ЕС-диода характерны низкие динамические потери в сочетании с очень высокой надежностью. Процесс восстановления диода был протестирован при токе модуля 200 А и мощности  $P_{\max} \geq 4$  МВт, что не привело к его повреждению.

#### **Устойчивость к току перегрузки**

Аварийная ситуация, например короткое замыкание в линии электропередачи, мо-

жет привести к возникновению опасного тока перегрузки в процессе работы диода. Следовательно, возможность эксплуатации при больших перегрузках становится важным критерием пригодности модуля к данному применению. Достаточную способность выдерживать высокий импульсный ток можно получить за счет оптимизированной вертикальной структуры, обеспечивающей низкое значение  $V_F$  вместе с реализацией HDR-концепции. Для модуля с номинальным током  $I_C = 1200$  А может быть достигнуто типовое значение  $I_{FSM} = 10$  кА, что соответствует показателю  $I^2t$  около 500 кА<sup>2</sup>с при температуре 125 °С или 460 кА<sup>2</sup>с при 150 °С.

#### **Устойчивость к космическому излучению**

IGBT с рабочим напряжением 4,5 кВ и ЕС-диод разработаны с учетом высокой устойчивости к космическому излучению. Вертикальная структура прибора обеспечивает низкую напряженность электрического поля при номинальном напряжении DC-шины. Типовой показатель FIT, характеризующий количество отказов за 10<sup>9</sup> часов, для модуля FZ1200R45HL3 при напряжении питания 3 кВ составляет 100 FIT. Кроме режима подачи постоянного высокого напряжения на выключенный модуль, была рассмотрена устойчивость к воздействию

космического излучения в режиме коммутации. Моделирование подтвердило, что дополнительный динамический показатель FIT при уровне  $dV/dt$  до 2 кВ/мкс оказывается пренебрежимо малым благодаря ограниченной напряженности электрического поля в устройстве.

#### **Заключение**

Представленный в статье 4,5-кВ Trench FS IGBT с управляемым по эмиттеру (ЕС) диодом был разработан для промышленных применений, и особенно (в корпусе IHV-B) для HVDC-систем. Эти IGBT и диоды отличаются очень низким напряжением в открытом состоянии и быстрым включением, прежде всего при высоком напряжении и большом токе, выходящими за рамки стандартных условий. Одновременно модуль FZ1200R45HL3 показывает высокую стойкость в режиме короткого замыкания. Кроме того, продемонстрирована чрезвычайно высокая надежность IGBT и диода при выключении тока перегрузки. Новые приборы предназначены для эксплуатации при температуре до 150 °С. Эти особенности были реализованы путем адаптации структуры Trench-ячеек, а также вертикальной структуры 6,5-кВ IGBT с помощью технологии HDR.