

# Модули Mitsubishi Electric

## на базе 6-го поколения IGBT

**Биполярные транзисторы с изолированным затвором — основной компонент инверторов, источников питания и электропривода. Модули IGBT выпускаются в широкой гамме мощностей от менее чем 1 кВт до более чем 1 МВт. В настоящее время на рынок выходит новое (6-е) поколение транзисторов IGBT от компании Mitsubishi Electric.**

**Такео Нисияма (Taketo Nishiyama)  
Юджи Миязаки (Yuji Miyazaki)  
Перевод: Роман Фукалов**

### IGBT-модули серии NX

Обычно модули IGBT — в зависимости от их мощности и назначения — выпускаются в корпусах различного размера и конфигурации. Более того, они содержат большое число различных компонентов, таких как корпус, базовая пластина, силовые выходы и т. д. В серии NX используется другой подход: ключевой особенностью данных устройств является использование унифицированных частей корпуса при создании различных типов модулей: ключ, полумост, «7 в 1», С1В (выпрямитель, инвертор, тормозной ключ) и т. д. Конструкция корпуса позволяет создавать различные варианты внутренней топологии и свободно размещать выходы. Примеры корпусов показаны на рис. 1.

### Технология

#### Развитие кристаллов IGBT

На рис. 2 можно увидеть эволюцию IGBT от поколения к поколению. Для оценки производительности используется понятие добротности (Figure of Merit). Она определяется как плотность тока через кристалл ( $J_c$ ), поделенная на произведение напряжения насыщения ( $V_{CE(sat)}$ ) и потерь на выключение ( $E_{off}$ ) (значения даны при номинальной нагрузке на кристалл и температуре кристалла  $T_j = 125^\circ\text{C}$ ). Видно, что CSTBT (Carrier Stored Trench Gate Bipolar Transistor) имеет лучшую производительность, чем обычные траншейные транзисторы, а производительность 6-го поколения IGBT на 30% больше, чем у CSTBT.

#### 6-е поколение IGBT

На рис. 3 показаны структуры кристалла 6-го и 5-го поколений IGBT. Обе они используют технологию CSTBT. Первым отличием 6-го поколения является переход кристалльной технологии от NPT (Non Punch Through) к LPT (Light Punch Through) и к более тонким кристаллам. Вторым отличием является оптимизация структуры затвора с целью улучшения соотношения между  $V_{CE(sat)}$  и  $E_{sw(off)}$ .

Ячейки затвора расположены более плотно, оптимизирован дополнительный  $N^+$ -слой, обеспечиваю-

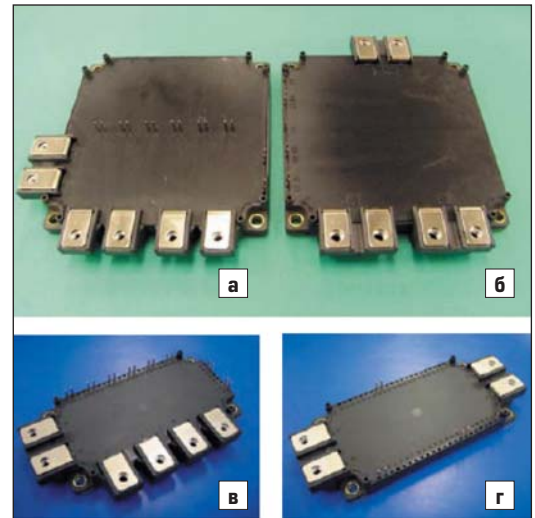


Рис. 1. Пример корпусов серии NX: а, б) «7 в 1»; в, г) «2 в 1»

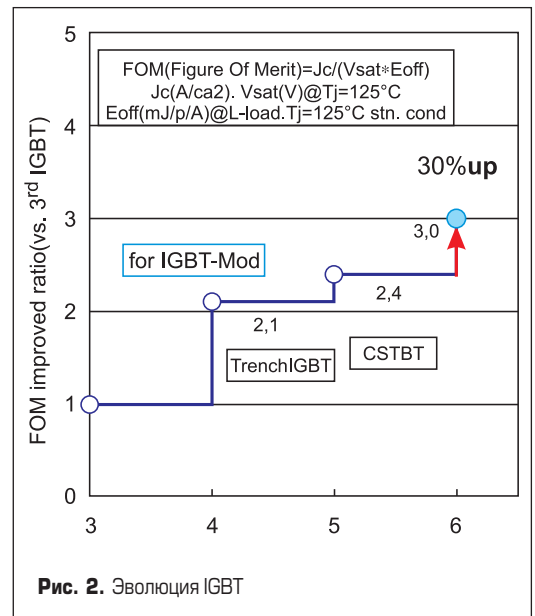


Рис. 2. Эволюция IGBT

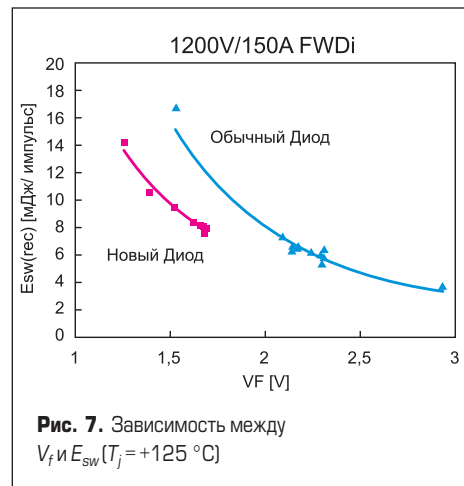
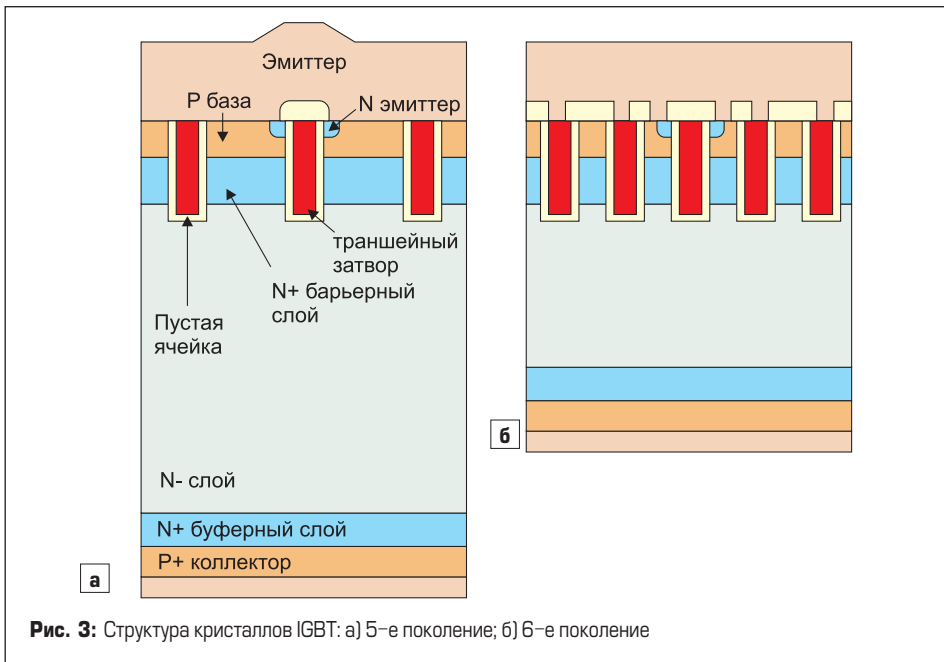


Рис. 7. Зависимость между  $V_f$  и  $E_{sw}(T_j = +125^\circ\text{C})$

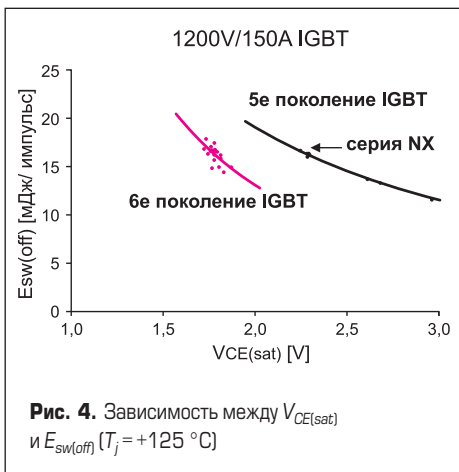


Рис. 4. Зависимость между  $V_{CE(sat)}$  и  $E_{sw(off)}$  ( $T_j = +125^\circ\text{C}$ )

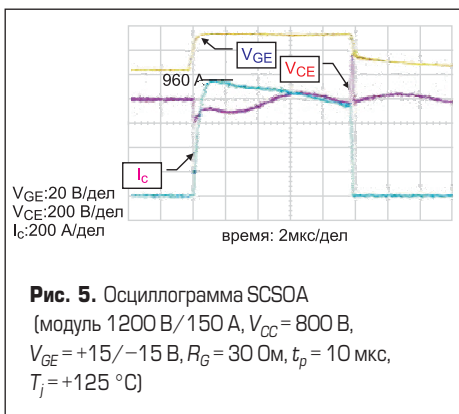


Рис. 5. Осциллограмма SCSOA (модуль 1200 В/150 А,  $V_{CC} = 800\text{ В}$ ,  $V_{GE} = +15/-15\text{ В}$ ,  $R_G = 30\text{ Ом}$ ,  $t_p = 10\text{ мкс}$ ,  $T_j = +125^\circ\text{C}$ )

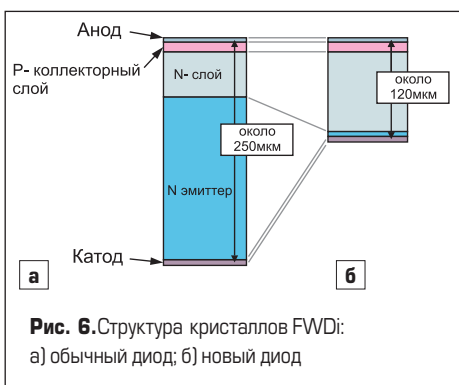


Рис. 6. Структура кристаллов FWDi: а) обычный диод; б) новый диод

ший блокировку утечки зарядов. Результат этих изменений — значительное уменьшение потерь (рис. 4). Необходимо учитывать, что чем меньше потери в приборе, тем сложнее обеспечивать зону безопасной работы при коротком замыкании (SCSOA). На рис. 5 можно увидеть пример осциллограммы короткого замыкания для 6-го поколения кристаллов. Благодаря оптимизации затвора удалось добиться стойкости к токам короткого замыкания более 10 мкс без ухудшения КПД прибора.

**Антипараллельный диод**

На рис. 6 изображены структуры обычного и нового антипараллельного диода, используемого в серии NX. Как показано на рис. 7, использование более тонких кристаллов способствует уменьшению как статических ( $V_f$ ), так и динамических ( $E_{sw(rec)}$ ) потерь.

**Поведение новых модулей при включении и выключении**

Уменьшение  $dv/dt$  при включении отлично срабатывает для уменьшения электромагнитных помех, вызываемых преобразователем. Обычно скорость  $dv/dt$  можно уменьшить, изменяя сопротивление затвора. Негативным при этом является то, что при уменьшении  $dv/dt$  увеличиваются потери на включение ( $E_{sw(on)}$ ).

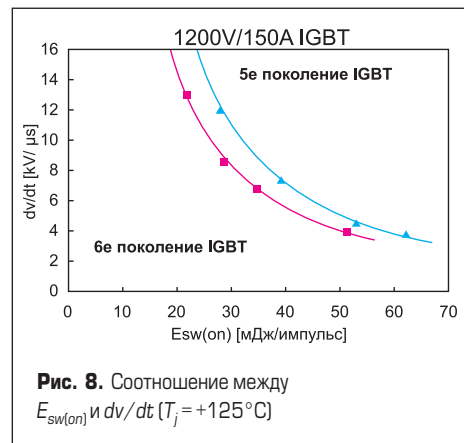


Рис. 8. Соотношение между  $E_{sw(on)}$  и  $dv/dt$  ( $T_j = +125^\circ\text{C}$ )

На рис. 8 показана зависимость между  $E_{sw(on)}$  и  $dv/dt$ . Как видно, в 6-м поколении IGBT потери  $E_{sw(on)}$  на 20% меньше, чем у обычных IGBT, при одной и той же скорости  $dv/dt = 7,5\text{ кВ/мкс}$ . Также благотворное влияние на соотношение между  $E_{sw(on)}$  и  $dv/dt$  оказывает новый антипараллельный диод (благодаря своему мягкому восстановлению). Как результат, 6-е поколение позволяет добиться низкого уровня помех при низком уровне потерь.

Потери при выключении IGBT зависят от так называемых токовых хвостов. Ток через коллектор не может быть остановлен моментально, так как в N-слое находится большое количество свободных электронов и дырок. Ток спадает со скоростью, зависящей от времени жизни электронов. В шестом поколении IGBT токовый хвост значительно уменьшен благодаря оптимизации LPT-структуры. На рис. 9 показаны осциллограммы выключения 5-го и 6-го поко-

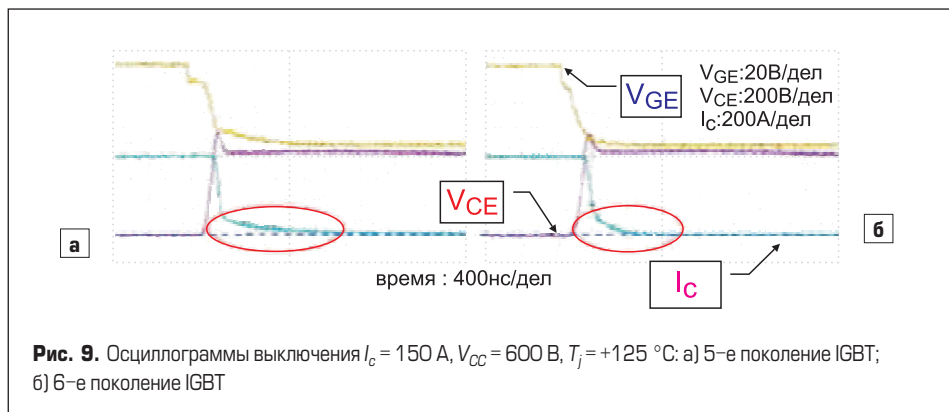
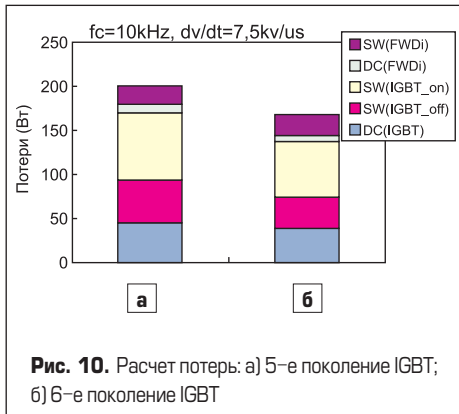


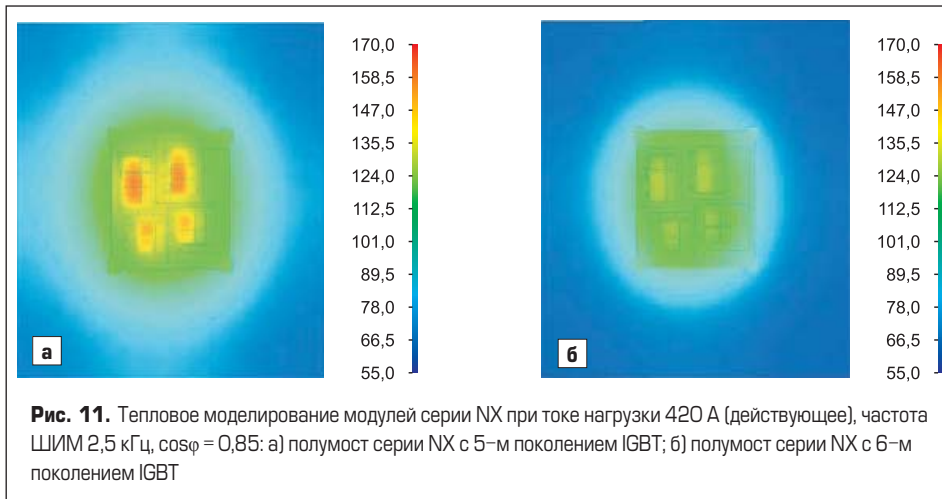
Рис. 9. Осциллограммы выключения  $I_c = 150\text{ А}$ ,  $V_{CC} = 600\text{ В}$ ,  $T_j = +125^\circ\text{C}$ : а) 5-е поколение IGBT; б) 6-е поколение IGBT



лений IGBT. Видно, что токовый хвост у 6-го поколения значительно меньше и, соответственно, приводит к меньшим потерям  $E_{sw(off)}$ .

**Уровень потерь**

На рис. 10 показаны уровни потерь для 5-го и 6-го поколения модулей IGBT (модули 1200 В, 150 А использованы в инверторе на 30 кВт, напряжение сети 400 В). Затворный резистор в обоих случаях выбран с расчетом



на то, чтобы обеспечить одну и ту же скорость  $dv/dt$  при включении (7,5 кВ/мкс). Наши расчеты показывают, что 6-е поколение модулей IGBT имеет на 20% меньшие потери, чем модули предыдущего поколения.

**Тепловое моделирование**

Тепловое моделирование модуля серии NX показано на рис. 11. Моделирование проведено для полумоста 1200 В, 1000 А, используемого в инверторе при нагрузке 185 кВт и питающем напряжении 400 В. Температура кристаллов при использовании 6-го поколения IGBT в среднем на 25 °С меньше, чем 5-го. Также температура кристаллов антипараллельных диодов меньше в среднем на 21 градус. Таким образом, при использовании 6-го поколения можно уменьшить размеры, вес и стоимость системы охлаждения.

**Надежность**

Во многих случаях срок службы модулей IGBT определяется величиной и количеством колебаний температуры кристаллов IGBT при

прерывистом режиме работы. На рис. 12 показаны кривые термоциклирования для модулей серии NX в сравнении с серией Н. Видно, что по этому параметру серия NX значительно усовершенствована. 6-е поколение IGBT позволяет поднять температуру кристаллов до +175 °С. Серия NX была протестирована при двух вариантах работы:  $T_{jmax} = +125$  °С и  $T_{jmax} = +175$  °С. Видно, что при  $T_{jmax} = +175$  °С стойкость к термоциклированию меньше, чем при  $T_{jmax} = +125$  °С, но больше, чем у серии Н при  $T_{jmax} = +125$  °С.

**Заключение**

Серия NX с кристаллами IGBT 6-го поколения показывает высокую производительность и низкий уровень электромагнитных потерь. Вкупе с отличной стойкостью к термоциклированию это позволяет создавать надежную и эффективную преобразовательную технику.

