

# Новые транзисторы NX6.1

## для промышленного применения

**Виктор Толстопятов**

Victor.Tolstopyatov@mer.mee.com

**Марко Хонсберг  
(Marco Honsberg)**

Marco.Honsberg@meg.mee.com

**Ойген Штумпф  
(Eugen Stumpf)**

Eugen.Stumpf@meg.mee.com

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), используемые в ключевом режиме, в настоящее время являются неотъемлемым компонентом приводной техники. Однако, появившись в конце 80-х годов как альтернатива биполярным транзисторам, IGBT-структура на основе кремния (Si) на сегодня практически полностью исчерпала себя, и улучшение характеристик кристаллов с каждым новым поколением модулей становится все менее значительным. Поэтому следующим шагом в развитии полупроводниковых материалов является MOSFET-структура на основе карбида кремния (SiC), обладающая огромным потенциалом. Старт данной технологии был положен много лет назад, и на сегодня Mitsubishi Electric уже имеет несколько уникальных продуктов на карбиде кремния для высокочастотных преобразователей, тяговых высоковольтных приводов, сервоприводов и даже для бытовой техники. Следует понимать, что в своей основе SiC является дорогим материалом, однако с помощью него можно добиться гораздо более высокой частоты переключения и низких потерь по сравнению с Si. Другими словами, в долгосрочной перспективе все дополнительные затраты могут окупиться.

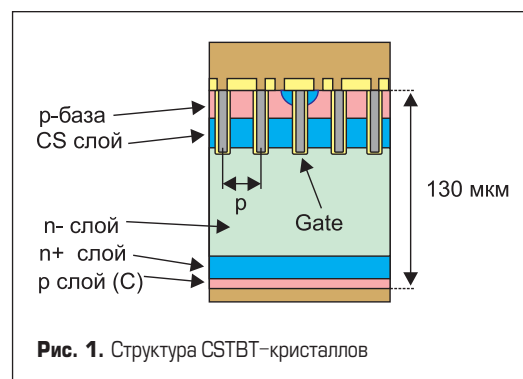
Под сегодняшние требования рынка преобразовательной техники вновь были усовершенствованы IGBT-кристаллы, имеющие CSTBT-структуру (Carrier Stored Trench Bipolar Transistor), являющиеся надежной основой силовых модулей и обладающие низкими динамическими и статическими потерями. Модули поколения 6.1, представленные в этой статье, содержат в себе CSTBT-транзисторы и обратные диоды (FwD) и выполнены в корпусе, совместимом с большим количеством промышленных стандартов. Новое поколение модулей отвечает требованиям промышленности по высокой надежности, низким потерям, высокой электромагнитной совместимости и невысокой стоимости.

### CSTBT-кристаллы поколения 6.1

#### CSTBT и структура транзисторов

Ключевым элементом новых модулей являются CSTBT-кристаллы поколения 6.1. В 1999 г. компания Mitsubishi Electric первой в мире представила коммерчески доступные IGBT с траншейным кана-

лом. Распространение CSTBT-структура получила к 2004 г., и к настоящему моменту уже претерпела множество улучшений. Кристалл поколения 6.1 на 1200 В схематично изображен на рис. 1. Чип имеет толщину около 130 мкм, при которой напряженность электрического поля в *n*-слое, показанном на рисунке, приближается к своему теоретическому пределу для данного материала. Такое значение толщины является оптимальным, так как кристаллы имеют достаточные изоляционные свойства и в то же время обладают минимальным «сопротивлением» *n*-слоя и, как следствие, низким напряжением насыщения ( $V_{CE(sat)}$ ). Это достигнуто за счет оптимизации технологии формирования слоев. В частности, расстояние между траншейными каналами затвора (*p*) играет ключевую роль: чем ближе расположены друг к другу каналы, тем меньше напряжение насыщения в проводящем состоянии. Главным ограничением здесь выступают особенности техпроцесса, связанные с минимально возможной шириной структуры. Структура кристалла поколения 6.1 уменьшилась до 400 нм в ширину, что уже само по себе приводит к низкому значению напряжения насыщения транзисторов. Специальный слой Carrier Stored layer («барьерный слой для накопления зарядов»), название которого содержится в аббревиатуре CSTBT, расположен между базой (*p*-база) и *n*-слоем (рис. 1). Этот слой позволяет затормозить движение положительных носителей и вызвать эффект их аккумуляции, а также спровоцировать их равномерное распределение, что увеличивает проводимость *n*-слоя. Это увеличение проводи-



мости можно рассматривать как аналогичное уменьшение сопротивления *n*-слоя, а значит, и уменьшение напряжения насыщения. Еще одной особенностью является то, что не все траншейные каналы имеют электрическую связь с электродом затвора. Эта технология носит название Plugged Cell Merged (PCM) и дает возможность ограничивать ток насыщения (при коротком замыкании, КЗ) в модуле. С использованием этой технологии стало возможным достичь тока короткого замыкания, в пять–восемь раз превышающего номинальный, не рискуя вывести из строя кристалл. Другим инновационным решением в кристаллах поколения 6.1 было увеличение активной площади кремния (рабочей области). Это стало возможным за счет технологии бокового легирования, что приводит к равномерному уменьшению поля к краям чипа и увеличивает удельную энергоемкость кристаллов по сравнению с предыдущим (шестым) поколением CSTBT.

**Потери**

Помимо уже упомянутой надежности, общие потери в силовых модулях являются не менее важным критерием при их выборе. Соотношение между динамическими и статическими потерями отчасти может регулироваться при производстве кристаллов путем их облучения и легирования, при этом оно выбирается оптимальным для каждого конкретного применения. Выше уже говорилось об оптимизации статических потерь, но в чипах поколения 6.1 также были улучшены и динамические потери, что делает модули серии NX6.1 привлекательными для применений с более высокой частотой коммутации.

**Статические потери**

Потери в проводящем состоянии модулей поколения 6.1 идентичны тому же показателю у предыдущего поколения и имеют более низкое значение по сравнению с другими коммерчески доступными модулями. На рис. 2 показана характеристика напряжения насыщения  $V_{CE(sat)}$  как функция тока коллектора, что позволяет сравнить ее с предыдущим, шестым поколением (450 А/1200 В) и другими доступными на рынке модулями. Характеристики сняты при напряжении затвора +15 В и темпе-

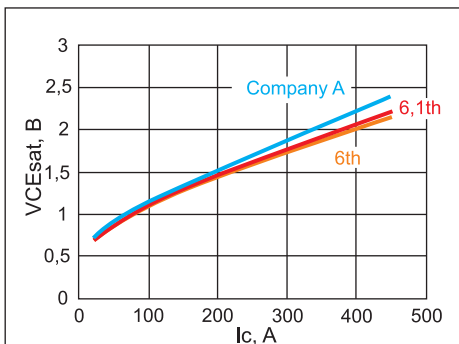


Рис. 2. Зависимость  $V_{ce(sat)}$  от тока коллектора при +125 °С

ратуре кристаллов +125 °С. Видно, что статические потери остались практически такими же низкими, как и у предыдущего поколения, что, несомненно, положительно отразится на долговечности преобразователя.

Хотя для кристаллов поколения CSTBT 6.1 указана максимальная рабочая температура +175 °С, что можно считать еще одним преимуществом, большинство характеристик, для сравнения, все же приводится для температуры +125 °С. В действительности, в номинальном режиме работы кристаллы в силовых модулях обычно рассчитываются и применяются на максимальную температуру +125 °С. Во время кратковременных перегрузок, которые возникают во множестве применений, температура кристаллов обычно не превышает +150 °С. Дополнительные 25° указаны в спецификации для работы в области безопасного переключения (Switching Safe Operating Area, SWSOA), однако используются редко. Этот имеющийся запас по температуре, в сравнении со многими другими доступными на рынке IGBT-модулями, является еще одним показателем высокой надежности CSTBT-модулей.

**Динамические потери и EMI**

Так как в новых CSTBT-кристаллах по сравнению с предыдущим поколением не были как-либо улучшены характеристики статических потерь, ясно, что оптимизация была направлена в сторону динамики. В двухуровневых схемах при коммутации тока, помимо CSTBT, практически всегда участвует обратный диод (за исключением довольно редких случаев режимов прерывистых токов). Поэтому потери на обратное восстановление диода, наравне с потерями на включение и выключение в CSTBT, играют решающую роль. Этот факт стал ключевым при разработке новых CSTBT-кристаллов, поскольку уменьшение динамических потерь было достигнуто именно за счет оптимизации переключения диодов, работающих в связке с IGBT. Также новые чипы позволяют путем изменения внешнего сопротивления затвора ( $R_G$ ) не только добиться наименьших потерь, но и улучшить электромагнитную совместимость (Electro-Magnetic Compatibility, EMC) модулей. За счет оптимизации взаимного влияния CSTBT-чипов и обратных диодов друг на друга в конечном итоге и были достигнуты меньшие потери и лучшая EMC. Рассмотрим энергию включения модуля 450 А/1200 В, зависимости которой от тока показаны на рис. 3. Данные осциллограммы были сняты для трех различных модулей при температуре кристаллов +125 °С и напряжении в звене постоянного тока (ЗПТ)  $V_{cc} = 600$  В.

При тех же самых параметрах была выполнена оценка потерь в обратном диоде, показанная на рис. 4. Видно, что уменьшение потерь в сравнении с предыдущим поколением для тока 400 А составило порядка 9 мДж.

Можно сделать вывод, что новое поколение CSTBT 6.1 имеет преимущество в энергии

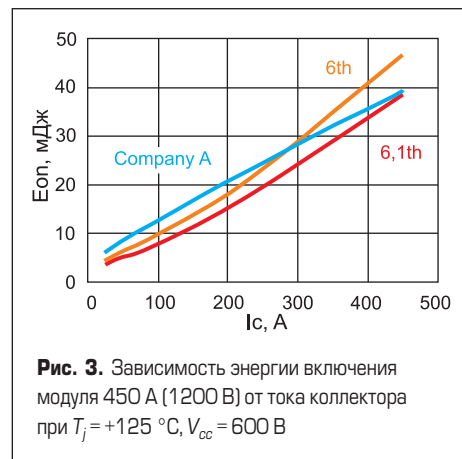


Рис. 3. Зависимость энергии включения модуля 450 А (1200 В) от тока коллектора при  $T_j = +125$  °С,  $V_{cc} = 600$  В

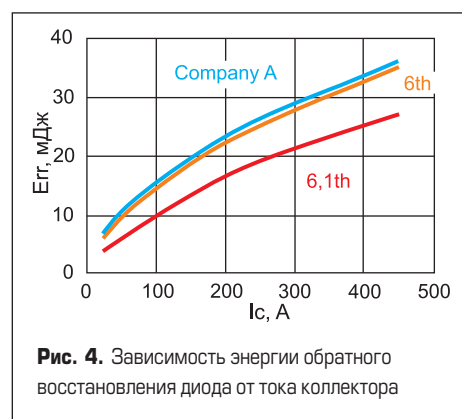


Рис. 4. Зависимость энергии обратного восстановления диода от тока коллектора

включения  $E_{(on)}$  и энергии обратного восстановления  $E_{(rr)}$  не только перед предыдущей серией, но и перед другими IGBT-модулями, доступными сегодня на рынке.

**Динамические режимы**

Было бы логично предположить, что такое уменьшение потерь было достигнуто за счет более быстрых переключений и резкого процесса обратного восстановления. Поэтому рассмотрим осциллограммы переключения транзистора и восстановления диода более детально.

**Включение**

Рассматриваемые осциллограммы напряжения и тока были сняты при напряжении на ЗПТ 600 В, токе коллектора 450 А и суммарном сопротивлении в цепи затвора  $R_{Gtotal} = 4,3$  Ом. Осциллограммы для модулей серии 6 показаны на рис. 5,

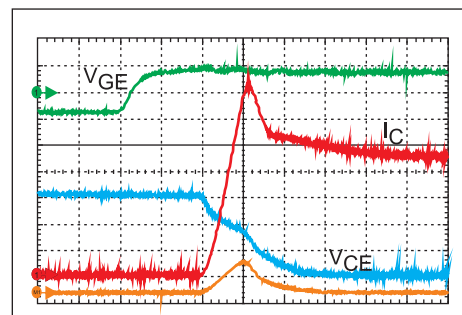


Рис. 5. Процесс включения модуля 6-го поколения

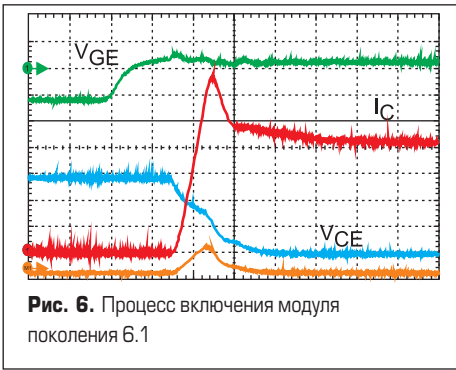


Рис. 6. Процесс включения модуля поколения 6.1

а для серии 6.1 — на рис. 6. В обоих случаях колебания тока и напряжения отсутствуют. Масштаб для осциллограмм на рис. 5 и 6:  $V_{CE}$  — 200 В/дел;  $I_C$  — 100 А/дел;  $V_{GE}$  — 20 В/дел; время — 200 нс/дел.

При сравнении данных осциллограмм становится видно, что какой-либо существенной разницы в значениях  $dV/dt$  между поколениями 6 и 6.1 нет, но характер кривой напряжения  $V_{CE}$  в случае с новой серией модулей носит более экспоненциальный характер. Напряжение же в модулях 6-го поколения спадает по более линейному закону. Поскольку ни максимум тока, ни так называемый токовый «хвост» на рис. 5 и 6 практически не отличаются, снижение потерь, являющихся произведением  $V_{CE}$  и  $I_C$  в новой версии происходит именно за счет экспоненциальной формы напряжения. Если обратить внимание на кривые мгновенной мощности (оранжевая линия на рисунках), видно, что площадь, охватываемая ими, в новых модулях меньше, откуда и следует уменьшение энергии включения, показанное на рис. 3. В результате этого анализа можно сделать вывод, что меньшие потери включения в новой серии достигаются за счет более низкого напряжения  $V_{CE}$  на последней трети

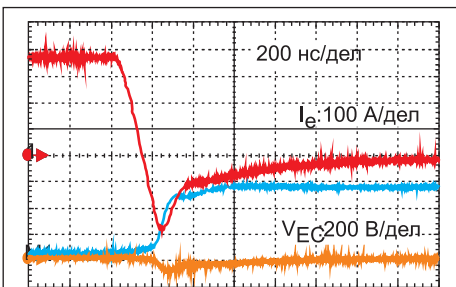


Рис. 7. Процесс обратного восстановления диода для 6-го поколения

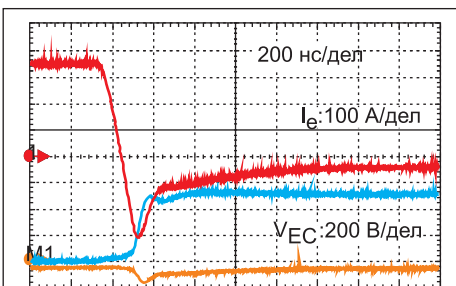


Рис. 8. Процесс обратного восстановления диода для поколения 6.1

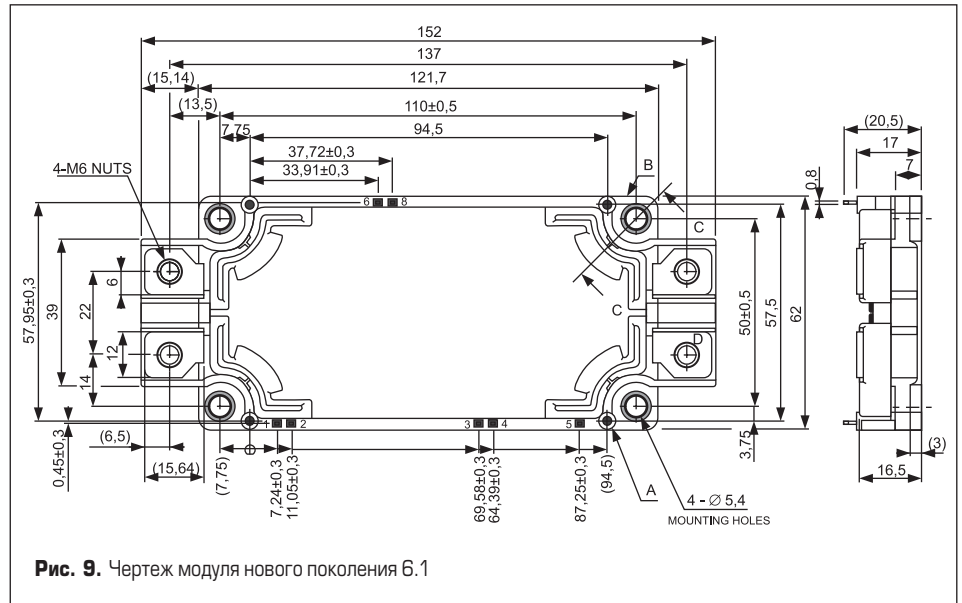


Рис. 9. Чертеж модуля нового поколения 6.1

переходного процесса, а не за счет значительного увеличения  $dV/dt$ . Это позволило новым модулям иметь аналогичную предыдущей серии электромагнитную совместимость. Другим важным фактором, влияющим на EMC, является процесс восстановления диода, рассмотренный в деталях ниже.

#### Обратное восстановление

На рис. 7 и 8 показан процесс обратного восстановления в диодах поколений 6 и 6.1 соответственно. Осциллограммы измерены при следующих параметрах: ток эмиттера 450 А; напряжение в ЗПТ 600 В; температура кристаллов  $T_j = +150^\circ\text{C}$ ; суммарное сопротивление в цепи управления затвором  $R_{Gtotal} = 4,3 \text{ Ом}$ . По осциллограммам видно, что, хотя амплитуда тока для обоих поколений практически не изменилась, ток на рис. 8 стремится к нулю быстрее при том же самом максимальном значении  $di/dt$ . Площадь, охватываемая кривой мгновенной мощности в диоде, в этом случае меньше, а это и есть показанная на рис. 4 энергия обратного восстановления диода в модулях поколения 6.1.

#### Корпус

Несмотря на то, что конструктив корпуса в целом слегка изменился, для большей совместимости с промышленными стандартами положение всех терминалов осталось прежним. В качестве керамической изоляции используется уже зарекомендовавший себя нитрид алюминия (AlN), обладающий существенными преимуществами перед оксидом алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и нитридом кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), используемыми в других доступных на рынке модулях. Напряжение изоляции между выводами модуля и пластиной основания возросло до 4000 В (RMS, 60 с), хотя обычно, ввиду того, что элементы на 1200 В работают при напряжении на ЗПТ менее 850 В, оно имеет значение лишь 2500 В (RMS, 60 с), что является международным стандартом.

Для увеличения воздушного зазора и пути тока утечки между силовыми выводами и базовой пластиной была увеличена высота боковых граней, а сами выводы теперь имеют слегка

зауженную форму. На рис. 9 изображен чертеж модуля, на котором можно увидеть данные изменения. Совершенствование характеристик кристаллов в новой серии, а также более эффективное использование площади кремния, о котором было упомянуто выше, позволили выпустить модуль на 600 А/1200 В в стандартном компактном корпусе.

#### Линейка NX6.1

Вся линейка модулей поколения 6.1 претерпела изменения. Доступные ранее в шестой серии приборы 200 А/1200 В были заменены новыми 225 А/1200 В. Также теперь имеется по два модуля в исполнении «шесть-в-одном» и «семь-в-одном» на токи 100 А, 150 А/1200 В и набор модулей «два-в-одном» на токи 225–600 А. Сравнительная таблица всей доступной линейки показана на рис. 10.

#### Заключение

Новые силовые CSTBT-модули поколения 6.1 сочетают в себе низкие статические потери предыдущего поколения, со сниженными динамическими потерями включения и обратного восстановления, достигнутыми за счет новых кристаллов транзисторов и диодов. Теперь на рынке доступна вся линейка модулей 1200 В, в стандартных корпусах, на токи 100–600 А, предназначенная как для классических систем управления двигателями, так и для систем, требующих повышенных частот коммутации.

Rating & Connection		Type Name	
1200 В	7in1	100 А	CM100RX-24S1
		150 А	CM150RX-24S1
	6in1	100 А	CM100TX-24S1
		150 А	CM150TX-24S1
	2in1	225 А	CM225DX-24S1
		300 А	CM300DX-24S1
	400 А	CM450DX-24S1	
	600 А	CM600DX-24S1	

Рис. 10. Линейка модулей нового поколения 6.1