

## Новые транзисторы NX6.1 серии (CSTBT) для промышленного применения, их структура и рабочие характеристики

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) транзисторы, 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) к сегодняшнему дню 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 сегодняшний день 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 кремнием. 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.

### 1. CSTBT кристаллы поколения 6.1

#### 1.1. 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 каналом. Распространение CSTBT структура получила к 2004 г., и к сегодняшнему дню уже претерпела множество улучшений. Кристалл поколения 6.1 на 1200В схематично изображен на Рис. 1. Чип имеет толщину около 130мкм, при которой напряженность электрического поля в n-слое, показанном на рисунке, приближается к своему теоретическому пределу для данного материала. Такое значение толщины является оптимальным, т.к. 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

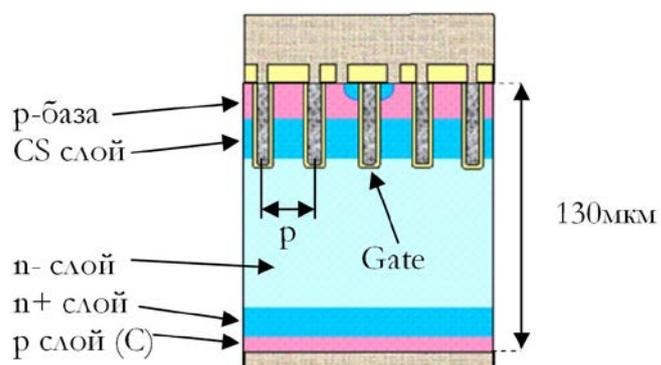


Рис. 1

транзисторов. Специальный слой «Carrier Stored layer – барьерный слой для накопления зарядов», название которого содержится в аббревиатуре CSTBT, расположен между базой (р-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 проводимости 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 К.З.) в модуле. С использованием этой технологии стало возможным достигнуть ток короткого замыкания в 5-8 раз превышающий 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 6 поколением CSTBT.

## 2. Потери

Помимо уже упомянутой надёжности, 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. В предыдущем параграфе 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.

### 2.1. Статические потери

Потери в проводящем состоянии модулей поколения 6.1 идентичны предыдущему поколению и имеют более низкое значение по сравнению с другими коммерчески доступными модулями. Рис. 2 показывает характеристику напряжения насыщения  $V_{CE(sat)}$  как функцию тока коллектора, и позволяет сравнить её с предыдущим шестым поколением (450A/1200V) и другими доступными на рынке модулями. Характеристики сняты при напряжении затвора +15В и температуре кристаллов 125°C. Как видно из рисунка, статические потери остались практически такими же низкими, как и в предыдущем поколении, что, несомненно, положительно отразится на долговечности преобразователя.

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

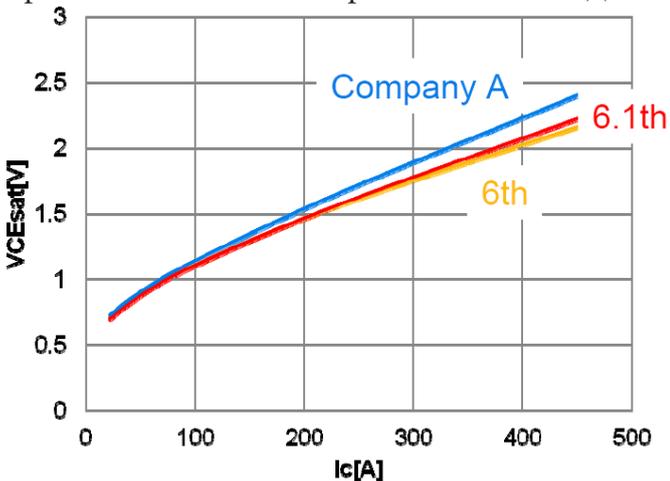


Рис. 2

работы в SWSOA (Switching Safe Operating Area – область безопасного переключения) однако используются редко. Этот запас по температуре, в сравнении со многими другими доступными на рынке IGBT модулями, является еще одним показателем высокой надежности CSTBT модулей.

### 2.2. Динамические потери и EMI

Т.к. 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, т.к. 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 (RG) не только добиться наименьших потерь, но и улучшить электромагнитную совместимость (EMC – Electro-Magnetic Compatibility) 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 450A/1200В, зависимости которой от тока показаны на Рис. 3. Данные осциллограммы были сняты для трех различных модулей при температуре кристаллов 125°C и напряжении в звене постоянного тока (ЗПТ)  $V_{CC}=600В$ .

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

Можно сделать вывод, что новое поколение CSTBT 6.1 имеет преимущество в энергии включения  $E(on)$  и энергии обратного восстановления  $E(rr)$  не только перед предыдущей серией, но и перед другими IGBT модулями, доступными сегодня на рынке.

### 3. 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.

#### 3.1. Включение

Рассматриваемые осциллограммы напряжения и тока были сняты при напряжении на ЗПТ 600В, токе коллектора 450А и суммарном сопротивлении в цепи затвора  $R_{Gtotal}=4,3Ом$ . Осциллограммы для модулей серии 6 показаны на Рис. 5, а для серии 6.1 на Рис. 6. В обоих случаях колебания тока и напряжения отсутствуют.

(Масштаб для осциллограмм на Рис. 5 и Рис. 6:  $V_{CE}$  – 200В/дел;  $I_C$  – 100А/дел;  $V_{GE}$  – 20В/дел; время – 200нс/дел)

Сравнивая данные осциллограммы, 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» между рисунками 5 и 6 практически не отличаются, снижение потерь, являющихся

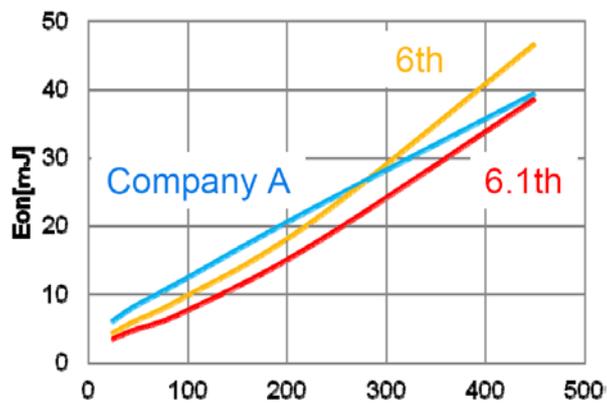


Рис. 3

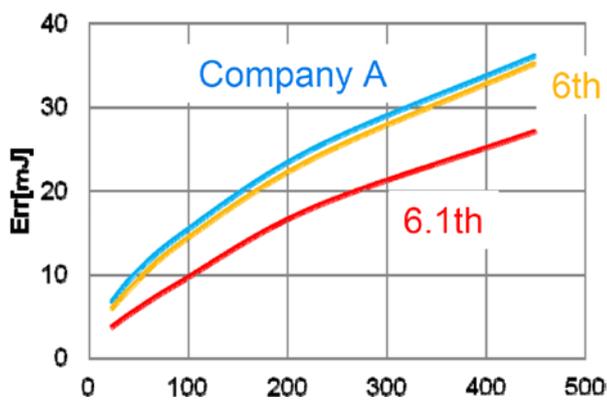


Рис. 4

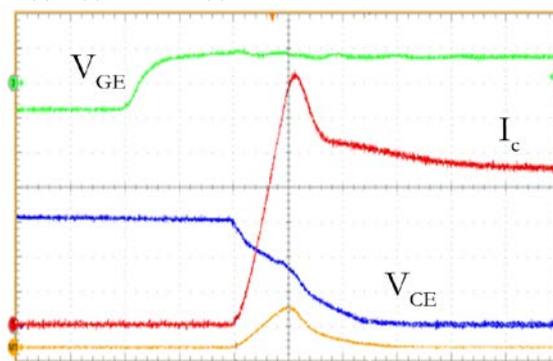


Рис. 5

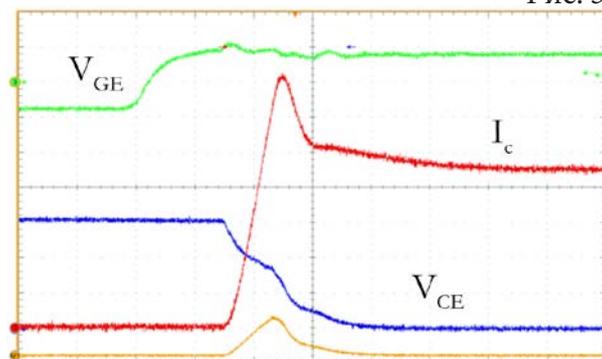


Рис. 6

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 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, рассматриваемый в деталях ниже.

### 3.2. Обратное восстановление

На рисунках 7 и 8 показан процесс обратного восстановления в диодах поколений 6 и 6.1 соответственно. Осциллограммы измерены при параметрах: ток эмиттера 450А; напряжение в ЗПТ 600В; 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.

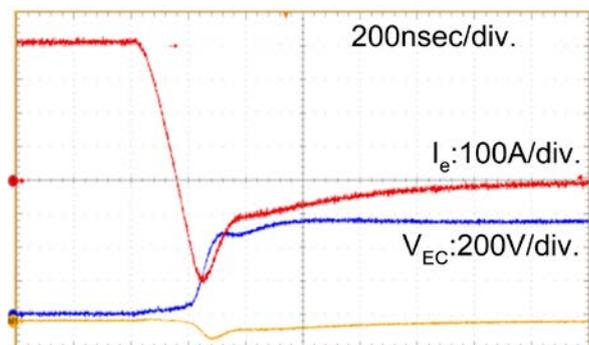


Рис. 7

## 4. 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 используются уже зарекомендовавший себя нитрид алюминия (AlN), обладающий существенными преимуществами перед оксидом алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и нитридом кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), используемых в других доступных на рынке модулях.

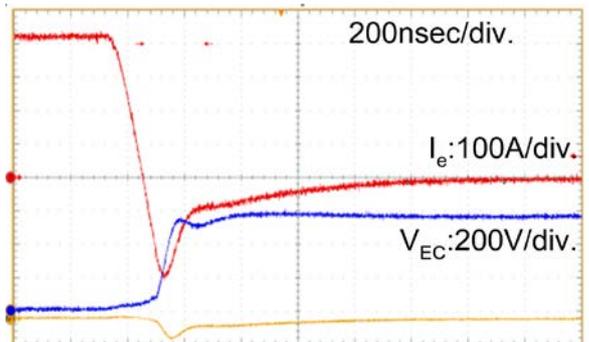


Рис. 8

Напряжения изоляции между выводами модуля и пластиной основания возросло до 4000В (RMS, 60 сек), хотя обычно, ввиду того, что элементы на 1200В работают при напряжении на ЗПТ менее 850В, оно имеет значение лишь 2500В (RMS, 60 сек), 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 600А/1200В в стандартном компактном корпусе.

## 5. Линейка NX6.1

Вся линейка модулей поколения 6.1 претерпела изменения. Доступные ранее в 6-ой серии приборы 200А/1200В были заменены новыми 225А/1200В. Также теперь имеется по 2 модуля в исполнении шесть-в-одном и семь-в-одном на токи 100А, 150А/1200В и набор модулей два-в-одном на токи 225-600А. Сравнительная таблица всей доступной линейки изображена на Рис. 10.

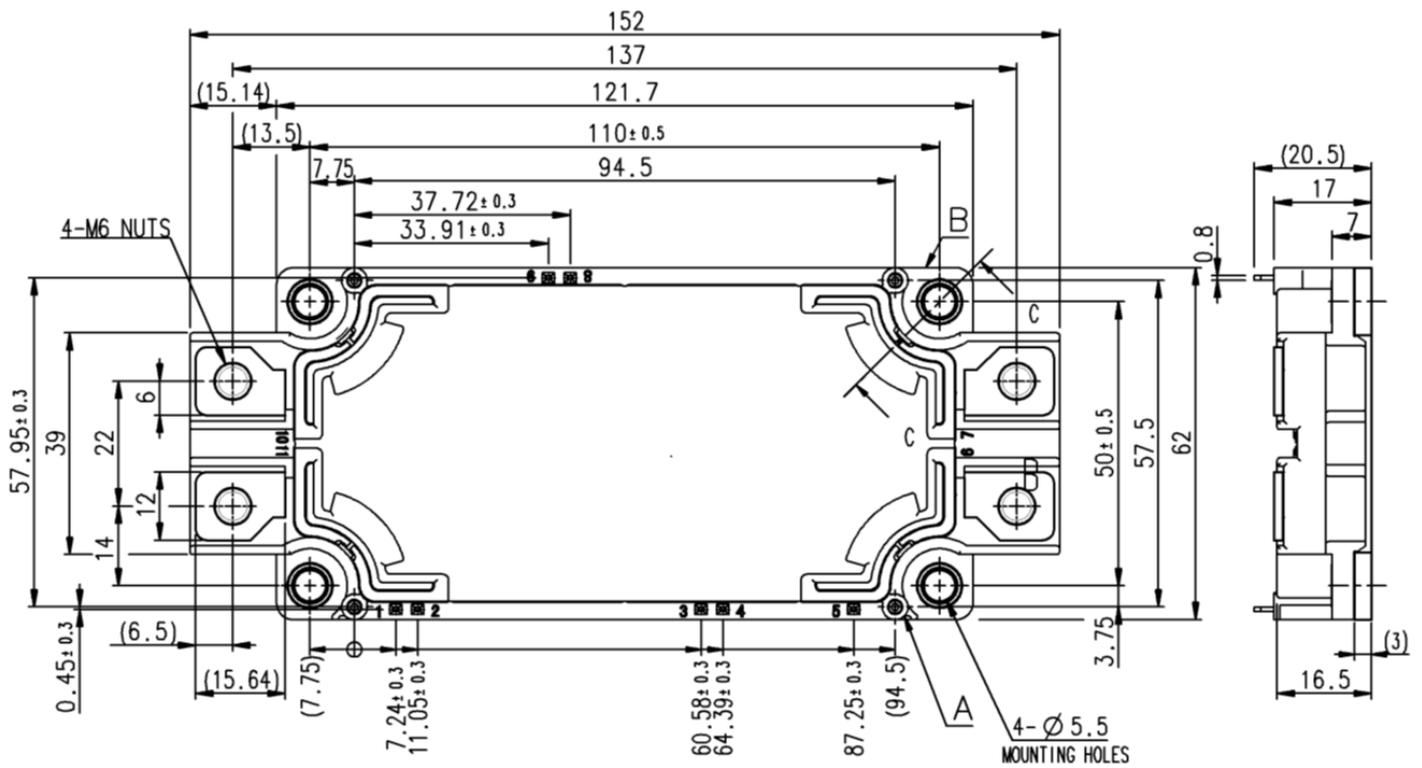


Рис. 9

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

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 1200В, в стандартных корпусах, на токи от 100 до 600А, предназначенная как для классических систем управления двигателями, так и для систем, требующих повышенных частот коммутации.