

# NPT, Trench, SPT...

## Что дальше?

**В технической литературе часто можно прочесть заключения авторитетных специалистов о том, что технология IGBT себя изжила, все параметры доведены до физических пределов, значительных улучшений не предвидится. Однако практика последних лет показывает, что как только таких мнений становится достаточно много, обязательно появляется очередная идея, приводящая к новому качественному скачку в технологии этих чрезвычайно популярных силовых ключей. Данный процесс идет по спирали, и мы видим, что даже эволюционные изменения, подчас связанные с небольшой доработкой структуры или появлением нового слоя, приводят к существенному улучшению характеристик. В статье дан краткий обзор существующих поколений IGBT и предложена информация о новых технологиях, которые придут к нам в ближайшем будущем.**

**Андрей Колпаков**

andrey.kolpakov@semikron.com

### Вместо предисловия

Постоянное совершенствование процесса изготовления кристаллов, использование новых технологических решений приводят к непрерывным эволюционным изменениям характеристик силовых ключей. Революционные инновации связаны в первую очередь с технологиями тонких пленок, применение которых позволяет не только повысить экономическую эффективность производства, но и создать IGBT с принципиально новыми свойствами. Прежде всего имеются в виду ключи с симметричной пробойной характеристикой (RB IGBT — Reverse Blocking IGBT) и ключи с функцией обратной проводимости (RC IGBT — Reverse Conducting IGBT). Ведущие поставщики чипов, такие как Infineon, ABB, Mitsubishi, работают над этими кристаллами, а об их основных особенностях мы поговорим во второй части статьи.

Характеристики «идеального» транзистора, к которым стремятся производители кристаллов, должны удовлетворять трем основным требованиям, показанным в виде «триады компромиссов» на рис. 1. Для того чтобы электронный релейный элемент мог

считаться «почти идеальным», он должен иметь близкие к нулевым потери проводимости, определяемые сопротивлением открытого канала  $R_{dson}$  для MOSFET или напряжением насыщения  $V_{CEsat}$  для IGBT. А кроме того, выдерживать высокое обратное напряжение  $V_{CE}$  в выключенном состоянии и иметь минимальные потери выключения  $E_{off}$ .

Соотношение характеристик  $V_{CEsat}$ ,  $V_{CE}$  и  $E_{off}$ , главным образом, и определяет уровень IGBT как биполярного силового ключа. Для униполярной MOSFET-структуры основными критериями считаются соотношения  $R_{dson}$  и обратного напряжения  $V_{DSS}$ . Естественно, третьим параметром, от которого зависит надежность и безопасность работы транзистора во всех режимах, является область безопасной работы ОБР (или SOA — Safe Operating Area). Эта характеристика должна обеспечиваться в трех основных режимах, соответственно, она имеет три составляющие: ОБР в состоянии проводимости (FBSOA — Forward Biased SOA), в выключенном состоянии (RBSOA — Reverse Biased SOA) и при коротком замыкании (SCSOA — Short Circuit SOA).

### Несколько слов о «стандартных» IGBT

Однозначно определить термин «стандартная технология» применительно к современной силовой электронике достаточно сложно. Развитие технологий полупроводников происходит столь быстро, что мы подчас не успеваем заметить, когда новое становится стандартным, а стандартное устаревшим. Однако возьмем на себя смелость назвать стандартной технологией производства IGBT с применением эпитаксиальных пленок, тем более что это недалеко от истины. Напомним, что эпитаксиальная технология, до сих пор применяемая при производстве IGBT и называемая также ПТ (Punch Through), имеет следующие недостатки:

- ограниченная область безопасной работы: полный ток допускается при напряжении  $V_{CE}$  не превышающем 80% от номинального значения для снижения вероятности защелкивания;

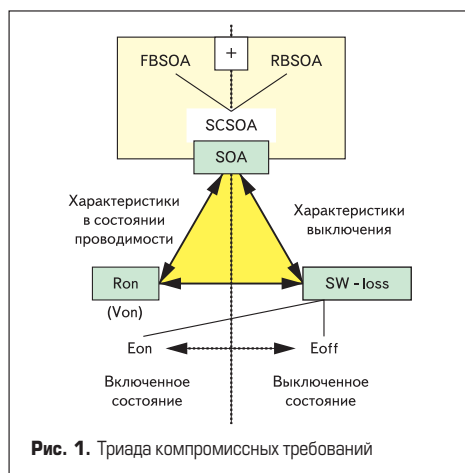
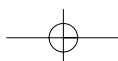


Рис. 1. Триада компромиссных требований



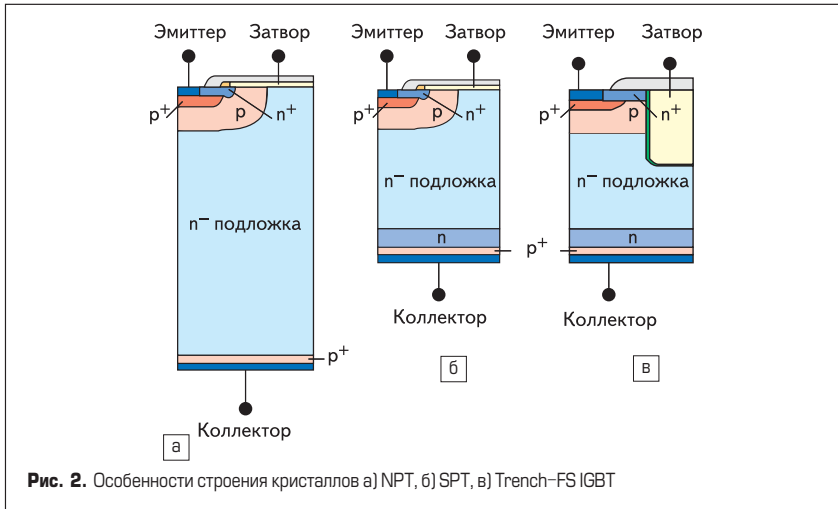
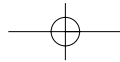


Рис. 2. Особенности строения кристаллов а) NPT, б) SPT, в) Trench-FS IGBT

- возможность защелкивания при предельных рабочих токах, связанная с наличием паразитной триггерной структуры (во всех современных IGBT паразитная структура практически подавлена);
- протяженный и зависящий от температуры «хвост» тока (tail current), результатом чего являются высокая энергия потерь при выключении  $E_{off}$ . «Хвостом» называется остаточный ток коллектора биполярной части IGBT, возникающий из-за рассасывания носителей в области базы после запираания транзистора;
- отрицательный температурный коэффициент напряжения насыщения, приводящий к статическому разбалансу токов при параллельном соединении.

Относительно новым «стандартом», широко применяемым многими производителями (особенно для быстрых IGBT), является технология NPT (Non Punch Through). При изготовлении чипов NPT (рис. 2а) используется однородный диффузионный  $n^-$ -слой подложки толщиной около 200 мкм. На нем расположен планарный затвор, а биполярный  $p-n-p$ -транзистор формируется с помощью добавления слоя  $p^+$  в основание базы. Описанная гомогенная структура лишена недостатков PT IGBT, в частности, она имеет высокую стойкость к короткому замыканию, положительный температурный коэффициент напряжения насыщения и прямоугольную область безопасной работы RBSOA. Возможность защелкивания в NPT IGBT исключена для всех значений рабочих токов, вплоть до тока короткого замыкания. Однако для обеспечения высокой стойкости к пробую такая структура должна иметь широкую область подложки, а значит, и сравнительно большое значение напряжения насыщения.

На базе NPT разработано несколько новых типов кристаллов, применяемых при производстве современных модулей. Прежде всего, это SPT и Trench, предлагаемые основными поставщиками чипов IGBT для рынка силовой электроники — ABB и Infineon. Такие кристаллы используют ведущие европейские производители компонентов для силовой электроники — SEMIKRON и EUPEC.

Основными параметрами, по соотношению которых определяются частотные свойства кри-

сталла IGBT и его «специализация», являются напряжение насыщения, заряд затвора и энергия переключения. Каждый из упомянутых типов IGBT имеет свои преимущества с точки зрения области применения. На рис. 2 показано строение кристаллов IGBT, производимых по технологиям NPT, SPT, Trench, а их типовые характеристики приведены в таблице 1.

Чипы SPT содержат дополнительный буферный  $n^-$ -слой, расположенный между подложкой и  $p^+$ -областью коллектора. Буферный слой повышает стойкость транзистора к пробую, опасность которого возрастает из-за уменьшения толщины подложки. Благодаря меньшей толщине чипа у SPT-транзисторов снижены потери проводимости.

Модули SPT имеют оптимизированные характеристики выключения: линейное нарастание напряжения при выключении, более плавный переходный процесс, меньший уровень перенапряжения, сокращенный «хвост» тока. Энергия переключения SPT-IGBT ниже, чем у модулей, выполненных по NPT-технологии. Площадь кристалла и тепловые характеристики обоих типов IGBT соизмеримы.

При изготовлении транзисторов Trench-FS (Field Stop) также используется буферный  $n^-$ -слой в основании подложки, как показано на рис. 2в. Однако у этого типа кристаллов затвор выполнен в виде глубокой канавки (trench) в теле подложки. Такая структура затвора в со-

Таблица 1. Основные характеристики типов IGBT (на примере модулей SEMIKRON)

Параметр, условия измерения	UltraFast серия 125	Trench FS серия 126	SPT серия 128	
$V_{CEsat}$ В	$T_j = 25^\circ\text{C}$	3,3	1,7	2,0
	$T_j = 125^\circ\text{C}$	4,1	2,0	2,3
Темп. коэффициент $V_{CEsat}$	$T_{jmin} - T_{jmax}$	положит.	положит.	положит.
$E_{tot}$ мДж	$T_j = 125^\circ\text{C}$	15	25	21
	$I_C = 100\text{ A}$			
$Q_{gr}$ нКл	$I_C = 100\text{ A}$	1000	700	1000
	$S_{ch} = 100\text{ мм}^2$	620	700	620

$V_{CEsat}$  — напряжение насыщения;

$E_{tot}$  — общая энергия переключения;

$Q_{gr}$  — заряд затвора;

$T_j$  — температура кристалла;

$I_C$  — ток коллектора;

$S_{ch}$  — площадь кристалла.

четании с модифицированной конструкцией эмиттера позволяет оптимизировать распределение носителей в области подложки. В результате напряжение насыщения транзисторов Trench-FS оказывается на 30% ниже, чем у NPT, а площадь кристалла — меньше почти на 70%. Соответственно, технология Trench-FS позволяет получить большую плотность тока. «Платой» за все описанные улучшения становится повышенное тепловое сопротивление и заряд затвора. Стоимость изготовления кристаллов Trench несколько больше, чем SPT, однако для их производства требуется меньше кремния, что нивелирует разницу в цене.

Технологии изготовления SPT и Trench являются сегодня наиболее отработанными, их преимущества перед стандартными IGBT очевидны. Главное отличие состоит в том, что применение Trench-FS позволяет получить сверхнизкие потери проводимости, а SPT обеспечивают хороший компромисс характеристик проводимости и переключения. Оба типа модулей IGBT обладают высокой стойкостью к короткому замыканию (КЗ), а также эффектом самоограничения тока коллектора на уровне, не превышающем 6-кратного номинального значения. В результате существенно снижается уровень перенапряжений при срабатывании защиты от КЗ.

На рис. 3 приведена зависимость максимального тока (среднеквадратичное значение) от частоты для различного типа кристаллов IGBT

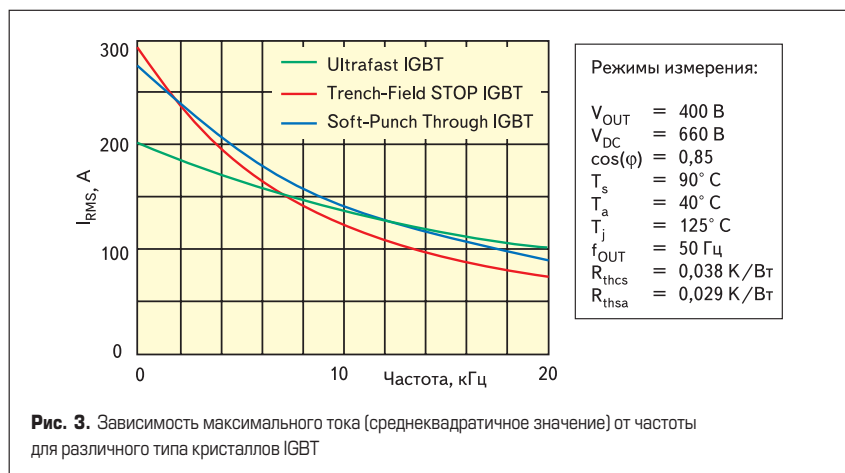


Рис. 3. Зависимость максимального тока (среднеквадратичное значение) от частоты для различного типа кристаллов IGBT

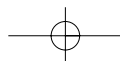


Таблица 2. Обозначение классов модулей у различных производителей

Класс IGBT	SEMIKRON	EUPEC	Mitsubishi	Характеристика типа
Стандартные (Standard)	123, 173	DN2	H, U (3 gen)	Средние значения параметров
Малые потери (Low Loss)	124, 174	DLC		Низкое напряжение насыщения $V_{CEsat}$
Быстрые (Fast, Ultrafast, Superfast)	063, 125	KS4 (Short tail)	NFH,	Низкое значение энергии потерь переключения $E_{on}$ , $E_{off}$
Сверхмалые потери (Ultra Low Loss, Trench)	066, 126, 176 (Trench)	KE3 (IGBT <sup>+</sup> )	NF (5 gen), F (4 gen)	Сверхнизкое напряжение насыщения $V_{CEsat}$
Универсальные (SPT/Fast Trench/SCTBT)	128 (SPT)	KT3 (Fast IGBT <sup>+</sup> )	A (5 gen CSTBT)	Оптимальное сочетание потерь проводимости и переключения

от частоты ШИМ для разного типа кристаллов IGBT. Условия эксплуатации и тепловые режимы, при которых были сделаны расчеты тока, также показаны на рисунке. Вычисления и построение графиков производились с помощью программы теплового расчета SEMISEL, разработанной специалистами SEMIKRON и доступной на сайте [www.semikron.com](http://www.semikron.com).

Свои «частотные предпочтения» есть у всех фирм-производителей, и выбор модуля всегда начинается именно с определения частотного диапазона. В таблице 2 приведены обозначения и даны характеристики основных типов модулей IGBT, выпускаемых ведущими производителями компонентов для силовой электроники — SEMIKRON, EUPEC, Mitsubishi. Показанное деление является достаточно условным и может быть использовано лишь для того, чтобы получить общее представление.

### CSTBT

Совершенствование характеристик IGBT происходит параллельно разработке тонкопленочных технологий и уменьшению размеров кристаллов — таким путем идут практически все производители чипов. Одновременно совершенствуются технологические процессы, примером может служить Trench-технология CSTBT, используемая компанией Mitsubishi.

Строение кристалла CSTBT показано на рис. 4, от «обычного» Trench IGBT данный элемент принципиально отличается всего одним слоем, названным Carried stored n layer (отсюда и название — Carried-Stored Trench-gate Bipolar Transistor). Концентрация носителей в нем несколько выше, чем у  $n^-$ -подложки. Носители  $n$ -типа (электроны), инжектируемые каналом Trench затвора, быстро распространяются в накапливающем их CS-слое. Его сопротивление и, соответственно, скорость

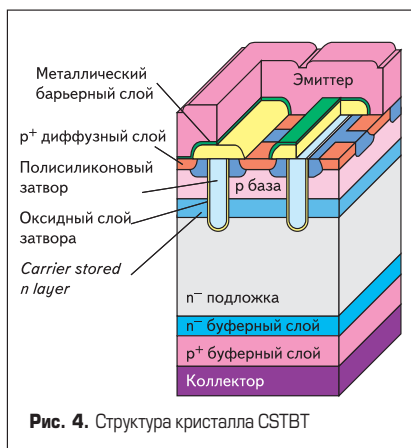


Рис. 4. Структура кристалла CSTBT

распространения носителей могут регулироваться с помощью изменения концентрации носителей. В то же время для дырок, инжектируемых  $p$ -коллектором, затруднено проникновение в область  $p$ -базы. Это происходит потому, что высокоэнергетический барьер  $p$ - $n$ -перехода, образованного CS-слоем  $n$ -типа с высокой концентрацией носителей и  $p$ -базой, расположен выше, чем переход, образованный слоем  $n^-$ -подложки с относительно низкой концентрацией носителей. В результате оптимальные условия для нейтрализации заряда создаются непосредственно под областью  $p$ -базы. Возникающий при этом так называемый эффект аккумуляции носителей способствует дальнейшему снижению прямого падения напряжения.

### LPT

Одновременно с совершенствованием структуры элементарных ячеек IGBT активно идет разработка кристаллов на основе тонкопленочных технологий. Эволюция IGBT, как и многие исторические процессы, происходит по спирали: первые кристаллы, появившиеся в 1978 году, изготавливались по NPT-технологии, следующий этап был связан с PT IGBT-транзисторами, при производстве которых использовались 2-слойные эпитаксиальные пленки. Очередной виток спирали соответствует переходу от NPT IGBT к LPT (Light-Punch-Through) структуре, показанной на рис. 5 и являющейся дальнейшим развитием PT-тонкопленочной технологии.

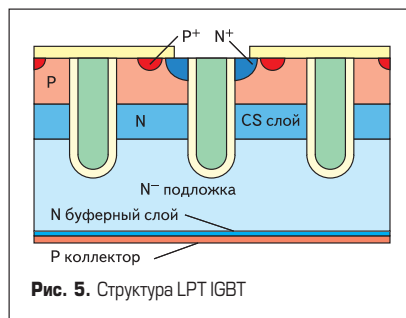


Рис. 5. Структура LPT IGBT

Разработка структур, подобных LPT, является ответом на растущие требования по повышению надежности и эффективности преобразовательных устройств и снижению производственных затрат. Одно из достоинств LPT — возможность реализации  $p$ -коллектора при относительно низкой концентрации носителей, что способствует расширению границ ОБР. В то же время наличие таких технологий позволяет создавать новые типы транзисторов, об особенностях некоторых из них мы расскажем далее.

### RB-IGBT

До сих пор мы говорили об улучшении характеристик IGBT в его обычном понимании. Однако совершенствование технологий тонких пленок позволяет наделять силовые ключи уникальными свойствами. О двух типах кристаллов IGBT, обладающих принципиально новыми возможностями, и пойдет речь в данном разделе.

К числу основных направлений современной силовой электроники относится разработка устройств, осуществляющих прямое преобразование энергии питающей сети в нагрузку и обратно, без промежуточного звена постоянного тока. Такие конвертеры в литературе часто называют матричными, а типичными применениями, в которых необходима двунаправленная передача энергии, являются приводы прокатных станов, конвейеров, лифтов. Электронные коммутаторы переменного тока также необходимы для работы альтернативных источников энергии, таких как ветрогенераторы, топливные элементы и солнечные батареи.

Необходимость в подобного рода преобразователях вызвана непрерывно растущими требованиями по повышению плотности мощности и энергосбережению, поскольку они позволяют возвращать часть запасенной энергии в сеть. Именно эти требования привели в свое время к появлению и активному развитию технологий MOSFET и IGBT. Проектирование матричных конвертеров с высокими потребительскими свойствами невозможно без специализированных электронных ключей. Широкие возможности для создания таких ключей предоставляют технологии на основе карбида кремния, однако пока они недостаточно отработаны.

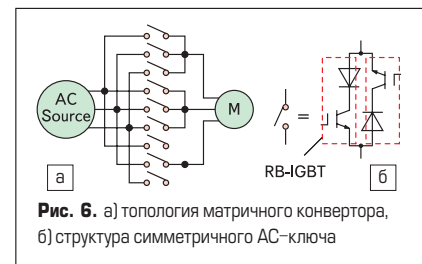
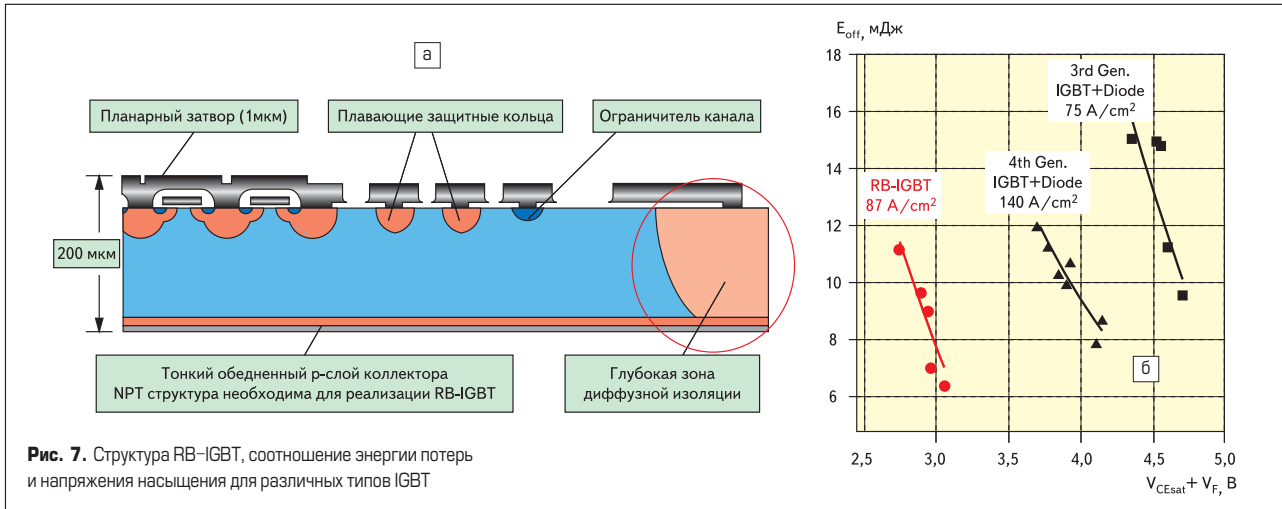


Рис. 6. а) топология матричного конвертора, б) структура симметричного AC-ключа

Сегодня наиболее рациональным подходом считается использование существующих IGBT-структур в качестве электронных ключей, способных коммутировать переменный ток. Модифицированные транзисторы, предназначенные для решения этой проблемы, получили название RB-IGBT (Reverse Blocking IGBT), или IGBT с симметричной характеристикой обратного напряжения.

Практически все 4-квadrантные преобразователи, производимые в настоящее время, строятся по схеме источника напряжения с промежуточным звеном постоянного тока большой емкости. Данная схема содержит два трехфазных мостовых усилителя (конвертор и инвертер), в каждом из которых используется шесть IGBT-модулей с антипараллельными диодами. Мощная DC-шина с конденсаторами, неизбежная в подобном устройстве,



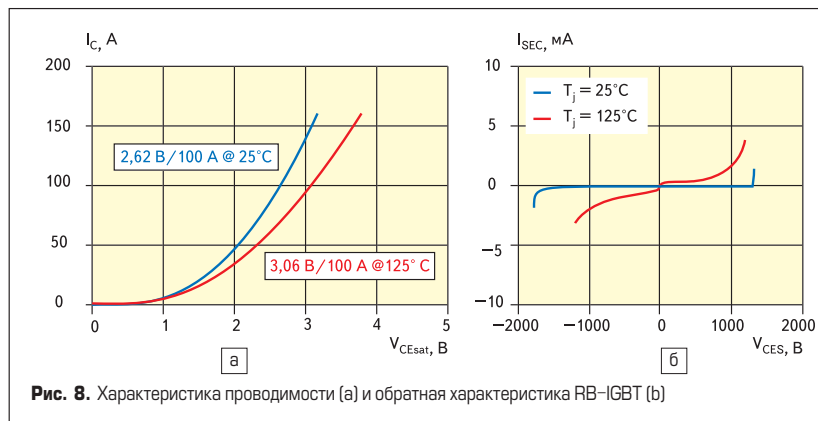
во многом определяет габариты, вес и надежность всего устройства. Как правило, для обеспечения надежности конденсаторы должны иметь свою систему охлаждения. Возможности отвода тепла от силовых ключей и звена постоянного тока зачастую являются фактором, ограничивающим допустимое значение плотности мощности.

В качестве альтернативы классической схеме инвертора напряжения предлагается матричный конвертор, схема которого показана на рис. 6а. Такой преобразователь осуществляет прямую передачу энергии от сети переменного тока к нагрузке и обратно без использования DC-шины. Основная проблема матричных конверторов — сложность аппаратной реализации: для работы подобных преобразователей требуется 9 двунаправленных ключей переменного тока. В отличие от инвертора напряжения, где обратные токи замыкаются через открытые антипараллельные диоды IGBT, транзисторы в матричной схеме должны выдерживать высокое напряжение обеих полярностей.

Для реализации АС-ключа с помощью обычного IGBT необходимо последовательно с ним установить быстрый высоковольтный диод, а чтобы коммутатор стал двунаправленным, две таких схемы следует соединить антипараллельно, как показано на рис. 6б. Кроме большого количества дискретных компонентов недостатком данного коммутатора являются высокие потери проводимости, что и ограничивает практическое применение подобных устройств.

Транзисторы RB-IGBT, разрабатываемые для преобразователей матричного типа, имеют симметричную характеристику обратного напряжения. Это означает, что в закрытом состоянии они могут выдерживать одинаково высокое прямое и обратное напряжение. Для реализации коммутатора переменного тока на основе RB-IGBT достаточно включить антипараллельно два транзистора.

По своей структуре Reverse Blocking IGBT (рис. 7а) очень мало отличается от транзистора, изготовленного по NPT-технологии. Основное различие состоит в использовании глубокой зоны диффузии, окружающей активную область чипа в районе коллектора. Изолирующий слой образуется в результате спе-



циального технологического процесса, обеспечивающего высокое напряжение пробоя и стабильные температурные характеристики тока утечки. Модули RB-IGBT производятся на основе тонкопленочной NPT-технологии. Тонкий *n*-базовый слой и субмикронная структура затвора обеспечивают транзистору низкие потери переключения и обратного восстановления. Соответствующий производственный процесс хорошо отработан и достаточно прост.

На рис. 8 представлены прямая и обратная характеристики RB-IGBT, а на рис. 7б — соотношение между энергией потерь выключения и потерями проводимости для RB-IGBT и симметричных ключей на основе IGBT с последовательным диодом. Как показывают графики, прямое падение напряжения специализированных IGBT примерно на 0,75 В ниже, чем у новейших транзисторов 4-го поколения с последовательно включенным диодом. При использовании RB-IGBT в матричных преобразователях не только в 2 раза сокращается количество необходимых компонентов, но и резко снижаются потери проводимости. Основные сравнительные характеристики двух типов симметричных ключей приведены в таблице 3. Из таблицы следует, что RB-IGBT имеют очевидные преимущества по потерям переключения  $E_{sw}$  и восстановления  $E_{rr}$  (с учетом характеристик диодов), что позволяет использовать их при относительно высоких частотах коммутации. В настоящее время практически все ведущие производители

**Таблица 3.** Сравнительные характеристики двух типов симметричных ключей IGBT ( $I_c = 100$  А,  $V_{ce} = 1200$  В)

Параметр, ед. измерения	RB-IGBT	IGBT + последовательный диод
$V_{CEsat}$ , В	3,06	3,80
$E_{sw}$ , мДж	11,6	19,1
$E_{rr}$ , мДж	11,7	12,2

чипов готовы к производству RB-IGBT, для начала массового их изготовления необходим соответствующий рыночный спрос.

### RC-IGBT

На практике очень часто в состав транзистора или модуля IGBT включается антипараллельный быстрый диод. Это необходимо для защиты транзистора от обратного напряжения и для замыкания тока индуктивной нагрузки. У MOSFET-транзисторов антипараллельный диод является неотъемлемой частью структуры, вот почему он и называется «внутренний» (body diode). Однако характеристики обратного восстановления технологических диодов MOSFET, особенно у их высоковольтных версий, далеки от совершенства, результатом чего становятся высокие потери включения в мостовых схемах. Из-за этого в ряде случаев внутренний диод MOSFET приходится исключать с помощью двух быстрых диодов.

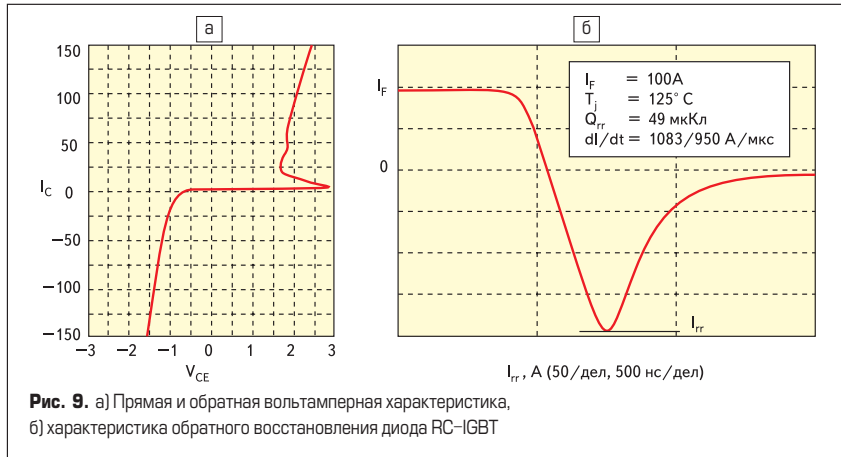
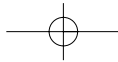


Рис. 9. а) Прямая и обратная вольт-амперная характеристика, б) характеристика обратного восстановления диода RC-IGBT

Такой проблемы не существует для IGBT, поскольку диоды, используемые в качестве антипараллельных, имеют хорошие динамические свойства и характеристики восстановления. Однако специализированные антипараллельные диоды — достаточно дорогие элементы, а их производство требует существенных затрат.

Внедрение диода в состав чипа стандартного PT или NPT IGBT — сложная технологическая задача, требующая значительного изменения структуры коллектора. Такая возможность появилась только в последнее время благодаря развитию тонкопленочных технологий. Первые опытные образцы транзисторов с интегрированным диодом, названные RC-IGBT (Reverse Conducting IGBT), или IGBT с обратной проводимостью, изготовлены компанией Mitsubishi на основе LPT-структуры (рис. 5). Функция обратной проводимости в транзисторах, которые выпускаются по этой технологии, достигается добавлением еще одного *n*-слоя в области коллектора. В качестве анода диода используется *p*-базовая область IGBT.

Не углубляясь в особенности строения RC-IGBT, перейдем к полученным результатам. На рис. 9а показаны прямая (первый квадрант) и обратная (третий квадрант) вольт-амперные характеристики (ВАХ) нового транзистора. В режиме прямой проводимости на ВАХ RC-IGBT наблюдается скачкообразное изменение кривой, когда прямое напряжение резко достигает 3 В и так же резко падает. Скачок напряжения происходит в области малых токов, поэтому такое искажение характеристики не должно повлиять на нормальную ра-

боту ключа. При активной площади чипа, равной 1 см<sup>2</sup>, и плотности тока 100 А/см<sup>2</sup> напряжение насыщения  $V_{CEsat}$  составляет 2,1 В, а падение напряжения на эквивалентном диоде в состоянии обратной проводимости (третий квадрант) не превышает 1,4 В при температуре 25 °С.

Сравнение прямых характеристик NPT и RC-IGBT показывает, что при одинаковых условиях работы напряжение насыщения новых кристаллов выше примерно на 0,4 В в области номинальных токов. Увеличение потерь проводимости — неизбежная плата за усложнение структуры кристалла. Одним из важнейших критериев, определяющих качественные показатели ключа, является соотношение потерь проводимости и энергии выключения. Эпюры, соответствующие процессу отключения для двух типов транзисторов при работе на индуктивную нагрузку, приведены на рис. 10. RC-IGBT имеет более короткий «хвост» тока (turn-off tail current) при выключении и, соответственно, меньшие потери выключения  $E_{off}$ . Комплексная предварительная оценка показывает, что, несмотря на большие потери проводимости, RC-IGBT выигрывает у NPT-IGBT по соотношению  $V_{CEsat}$  и  $E_{off}$ .

Как видно из графиков, представленных на рис. 9б, ток обратного восстановления  $I_{rr}$  внутреннего диода RC-IGBT достигает 200 А, что почти вдвое превышает значение, полученное для NPT-IGBT в аналогичных условиях. Поскольку анодом внутреннего диода RC-IGBT служит *p*-область базы, причиной большого тока  $I_{rr}$  является высокая неконтролируемая концентрация примесей в области базы.

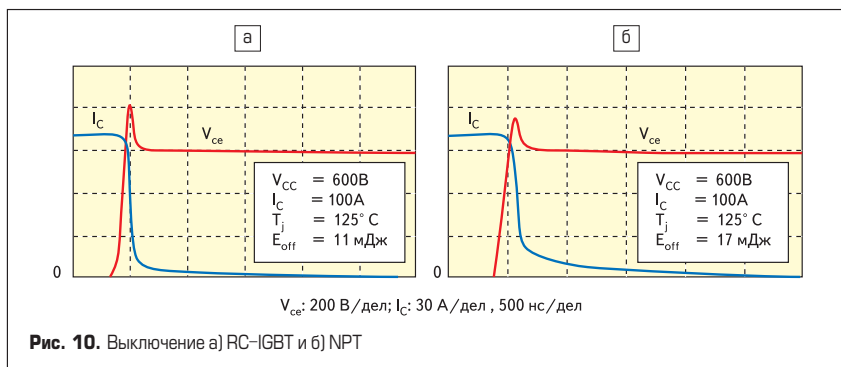


Рис. 10. Выключение а) RC-IGBT и б) NPT

Как и любое принципиальное новшество, технология RC-IGBT имеет свои сильные и слабые стороны. В применении к инвертору напряжения они выглядят следующим образом:

- + один кристалл выполняет функции IGBT и антипараллельного диода, можно создавать более компактные модули;
- + меньше количество соединительных проводников, меньше точек ультразвуковой сварки, выше надежность;
- + относительно простая конструкция кристалла;
- + более эффективное использование площади кристалла;
- потери IGBT и диода создаются одним кристаллом;
- требуются значительные технологические усилия для контроля процесса обратного восстановления диода.

Транзисторы RB-IGBT и RC-IGBT, о которых шла речь в данном разделе статьи, появятся на рынке лишь тогда, когда будут полностью отработаны и востребованы.

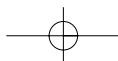
### HyperFast

До сих пор самыми «быстрыми» IGBT считались транзисторы серии WARP II, разработанные компанией International Rectifier и способные по своим динамическим свойствам заменить в некоторых применениях MOSFET. Однако такие компоненты выпускаются только в дискретных корпусах и предназначены для диапазона малых токов. До настоящего времени высокочастотные модули IGBT изготавливались по технологии UltraFast NPT.

В конце 2005 года компания SEMIKRON объявила о начале производства сверхбыстрых модулей IGBT семейства HyperFast, предназначенных для работы на частотах свыше 30 кГц. Модули серии 067 с рабочим напряжением 600 В в конструктиве SEMITOP, рассчитанные на применение в диапазоне мощности до 20 кВт, уже появились в производственной программе компании. Они выпускаются в различных конфигурациях, включая полумосты, чопперы и 3-фазные мосты, номинальный ток в зависимости от типа корпуса находится в диапазоне от 45 до 150 А.

Как показывают графики зависимости мощности потерь от частоты переключения, приведенные на рис. 11а, преимущества модулей HyperFast наиболее ярко проявляются на частотах выше 30–40 кГц. На меньших частотах их применение нецелесообразно из-за достаточно высоких потерь проводимости. Прямое падение напряжения  $V_{CEsat}$  для ключей 067-й серии составляет примерно 2,7 В при номинальном токе, зато энергия переключения у них снижена почти на 30% по отношению к компонентам класса UltraFast NPT.

Чтобы добиться максимальной эффективности применения модулей HyperFast на высоких частотах, компания SEMIKRON разработала новое поколение сверхбыстрых антипараллельных диодов, названных Turbo 2. На рис. 11б приведена характеристика, определяющая соотношение прямого напряжения  $V_F$  и заряда обратного восстановления  $Q_{rr}$  для ком-



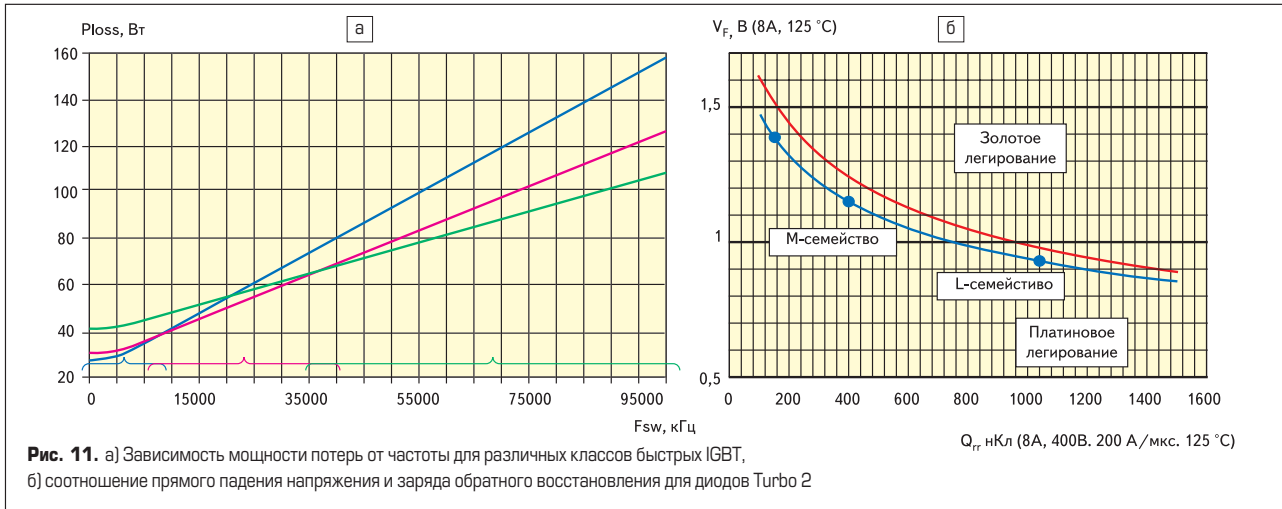


Таблица 4. Номенклатура модулей SEMITOP

Тип модуля	$I_{Cmax}$ @ 25 °C, А	$V_{CE(sat)}$ @ 25 °C, В	$(E_{ON}+E_{OFF})$ @ 125 °C, мДж	$R_{th(j-c)}$ °C/Вт	Тип корпуса
SK 30 GAL 067	45	2,8	3,4	0,85	SEMIP02
SK 40 GAL 067	62	2,8	5,1	0,6	SEMIP03
SK 50 GAL 067	83	2,8	6,7	0,45	SEMIP03
SK 30 GAR 067	45	2,8	3,4	0,85	SEMIP02
SK 40 GAR 067	62	2,8	5,1	0,6	SEMIP03
SK 50 GAR 067	83	2,8	6,7	0,45	SEMIP03
SK 30 GB 067	45	2,8	3,4	0,85	SEMIP02
SK 40 GB 067	62	2,8	5,1	0,6	SEMIP03
SK 50 GB 067	83	2,8	6,7	0,45	SEMIP03

понентов данного класса. По сравнению с диодами серии CAL предыдущего поколения величина  $Q_{rr}$  снижена в 3 раза, значение пикового тока обратного восстановления  $I_{RRM}$  — почти в 2 раза при одновременном уменьшении  $V_F$  на 25–30% (при температуре кристалла 125 °C)! Номенклатура модулей класса HyperFast с рабочим напряжением 600 В, предлагаемых в настоящее время, приведена в таблице 4.

### SPT+

Известие о появлении нового поколения модулей SEMIKRON SEMiX с кристаллами SPT+ [7] стало, пожалуй, самым интересным на выставке PCIM-2006, проходившей в Нюрнберге с 28 мая по 1 июня. Если заявленные характеристики данного класса IGBT окажутся реализованными, то у разработчиков впервые появятся по-настоящему универсальные модули, способные одинаково хорошо работать во всем диапазоне приводных частот.

Усовершенствованная технология производства кристаллов IGBT, названная SPT+, была разработана компанией ABB в 2005 году, а в начале 2006 года кристаллы стали доступны для коммерческого применения. Доработка базовой технологии SPT заключается в оптимизации элементов структуры, отвечающих за распределение носителей в области  $n$ -подложки. Данное усовершенствование позволило улучшить электрические характеристики ключей и уменьшить размер чипов. Кристаллы SPT+ обеспечивают более плавный характер переключения и имеют большую стойкость к  $dI/dt$  в режиме выключения при меньшем напряжении насыщения.

Снижение  $dI/dt$  в номинальных режимах, достигнутое благодаря модификации структуры чипа, позволяет уменьшить уровень перенапряжений на DC-шине и улучшить электромагнитную совместимость, что особенно важно для высокочастотных применений. Сравнительные характеристики базового и нового модулей, в каждом из которых использовано параллельное соединение трех кристаллов с номинальным током 100 А, приведены в таблице 5.

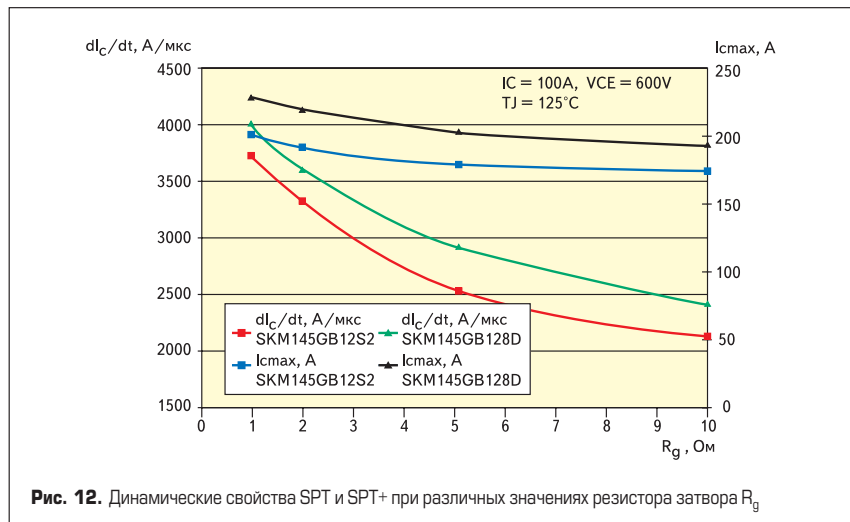
На рис. 12 показаны эмпоры, демонстрирующие разницу в динамических свойствах базового и нового кристаллов. Как видно из графиков, использование модулей SPT+ позволяет при тех же значениях резистора затвора  $R_G$  получить меньшее значение скорости вы-

Таблица 5. Сравнительные характеристики SPT и SPT+ IGBT (рабочее напряжение  $V_{CE} = 1200$  В, номинальный ток  $I_{Cnom} = 300$  А)

Параметры	SPT (серия 128)	SPT+ (серия 52)
Напряжение насыщения $V_{CE(sat)}$ @ 25/125 °C, В	1,9/2,1	1,6/1,8
Энергия потерь $E_{on} + E_{off}$ , мДж @ 100 А	17,5	17,8
Макс. допустимая скорость изменения $dI/dt_{max}$ , А/мкс	5250	5600
Размер кристалла @ 100 А, мм <sup>2</sup>	158	134
Тепловое сопротивление $R_{th(j-c)}$ @ 100 А, °C/Вт	0,17	0,19
Плотность тока, А/см <sup>2</sup>	85	96

ключения  $dI/dt$  и пикового тока восстановления  $I_{Cmax}$ , результатом чего является меньшее перенапряжение на шине звена постоянного тока и более высокая надежность работы в динамических режимах.

Предельная рабочая температура кристаллов SPT+ составляет 175 °C, что означает увеличение запаса по предельному току на 20–25%. Кроме пониженного уровня статических и динамических потерь, новая технология имеет еще одно уникальное свойство: кристаллы SPT+ обладают способностью к так называем-



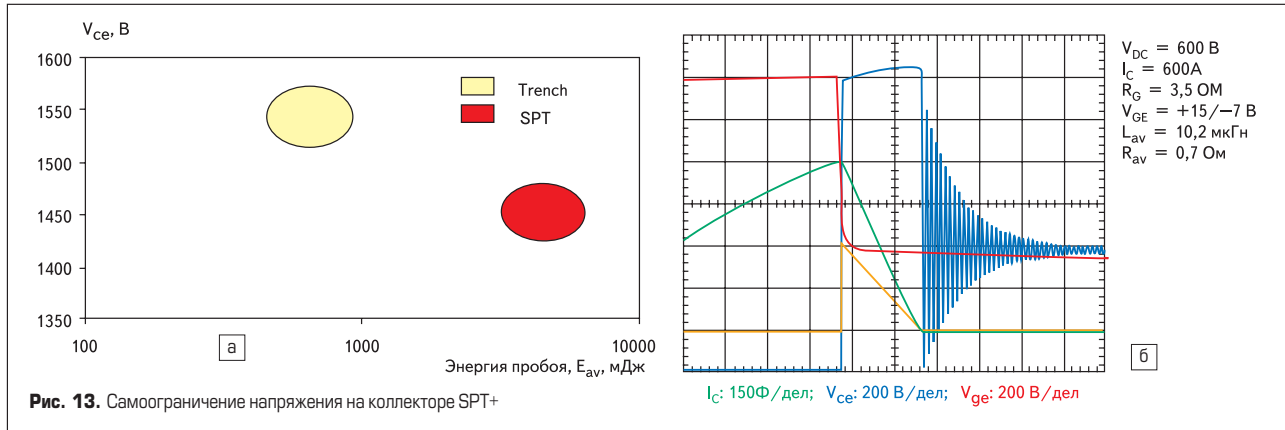
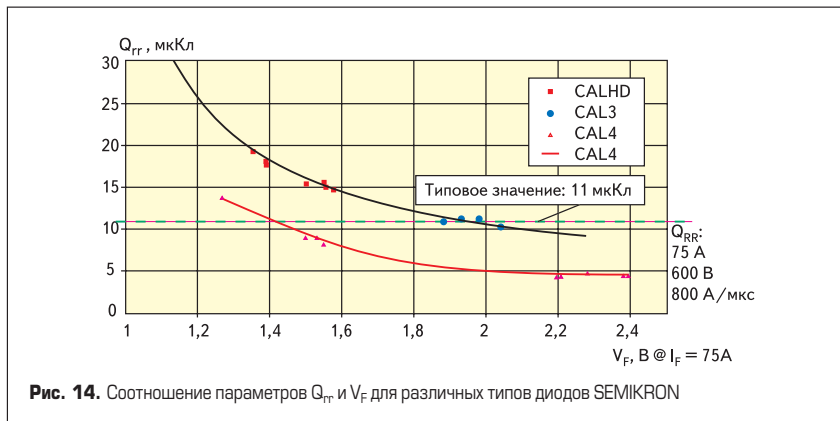


Рис. 13. Самоограничение напряжения на коллекторе SPT+

Рис. 14. Соотношение параметров  $Q_{rr}$  и  $V_f$  для различных типов диодов SEMIKRON

тому самоограничению (self-clamping) напряжения на коллекторе (рис. 13). Таким образом, SPT+ являются первыми низковольтными IGBT, способными поглощать ограниченную энергию лавинного пробоя (Avalanche Energy). Кстати, до сих пор эта характеристика была присуща только технологиям MOSFET. О свойстве самоограничения также было заявлено для новых высоковольтных модулей ABB с рабочим напряжением 2,5–4,5 кВ.

Для повышения экономической и технической эффективности преобразовательной техники современные разработчики стараются использовать силовые ключи в пиковых режимах, оставляя все меньше «запаса» по предельным характеристикам, будь то температура кристалла или напряжение питания. Именно поэтому повышение плавности процесса переключения и снижение уровня перенапряжений так важно для силовых модулей. В этой связи возможность самоограничения обеспечивает еще большую надежность работы в динамических режимах.

Специалистами компании SEMIKRON были проведены специальные исследования с целью определения стойкости к пробоем различных технологий IGBT. В левой части рис. 13 показана зона допустимых значений энергии лавинного пробоя и уровень напряжения ограничения для кристаллов Trench и SPT с рабочим напряжением 1200 В. Как видно из рисунка, уровень  $E_{av}$  для нового поколения кристаллов повышен почти на порядок по сравнению с технологией Trench 3.

На рис. 13б приведены эпюры, полученные при отключении модуля SPT+ с номинальным

током 600 А, работающего на индуктивную нагрузку без оппозитного диода. Измерения были проведены при следующих условиях: ток отключения — 600 А, напряжение на шине питания — 600 В, индуктивность нагрузки — 10,2 мкГн. Как показывает график  $V_{ce}$  (синяя эпюра), напряжение на коллекторе достигает значения примерно 1450 В и далее ограничивается на время спада тока коллектора. Описанное свойство новых кристаллов является очень полезным, обеспечивающим большой запас по надежности. Однако не следует забывать, что уровень ограничения находится за пределами предельных режимов работы, превышение которых должно быть исключено на этапе проектирования.

Инженерные образцы модулей SEMiX серии 12S2 с кристаллами SPT+ и техническая документация стали доступны летом 2006 года. Пробная серия должна быть выпущена в октябре, тогда же закончатся квалификационные испытания. До конца 2006 года должны появиться и модули серии 17S2 с рабочим напряжением 1700 В. Компания SEMIKRON планирует выпускать силовые ключи серии 12S2 в корпусе SEMiX 13 (3-фазный мост) с током 70–450 А, рабочий ток полумостовых модулей в корпусах SEMiX 2–4 будет находиться в диапазоне от 150 до 600 А. Полумосты с напряжением 1700 В серии 17S2 предполагается производить на ток от 150 до 600 А.

К концу 2006 года планируется и выпуск новых антипараллельных диодов CAL4, которые будут применяться совместно с SPT+ IGBT. Они рассчитаны на эксплуатацию при температуре до 175 °С, а предельный ток CAL4 дол-

жен быть на 40% выше, чем у используемых в настоящее время серий аналогичных элементов. Сравнительные характеристики антипараллельных диодов SEMIKRON, определяющие соотношение заряда обратного восстановления  $Q_{rr}$  и прямого падения напряжения  $V_f$ , представлены на рис. 14.

#### Trench 4

Модули IGBT в стандартных конструктивах еще долго будут востребованы рынком, поэтому над их модернизацией работают практически все фирмы-изготовители. В производственной программе SEMIKRON семейство стандартных IGBT модулей носит название SEMITRANS, а сами корпуса именуется SEMITRANS 1–4 для одиночных и полумостовых конфигураций и SEMITRANS 6, 7 для 3-фазных мостов.

Технология Trench IGBT 3-го поколения, используемая при производстве модулей SEMIKRON 126-й и 176-й серий, обеспечивает сверхнизкие статические потери. До недавнего времени характеристики проводимости этих ключей считались одними из лучших в своем классе, а сами модули использовались в низкочастотных применениях.

Усовершенствованная технология Trench 4-го поколения, разработанная Infineon, позволяет расширить область рабочих частот, улучшить электрические параметры силовых ключей и одновременно уменьшить размер чипов. Доработка прежней Trench-технологии заключается в оптимизации вертикальной структуры чипа, позволившей существенно снизить потери переключения. С появлением модулей серии T4 название Trench IGBT перестало быть синонимом низкочастотных ключей. Теперь наравне с SPT+ эти элементы претендуют на звание универсальных, широкополосных.

Сравнительные характеристики Trench IGBT 3-го и 4-го поколения, а также модулей 128-й серии, производимых по технологии SPT с планарным затвором, приведены в таблице 6. Мы сознательно включили в таблицу параметры широкополосных SPT-ключей, чтобы подчеркнуть переход технологии Trench 4 в новое качество. Некоторое увеличение теплового сопротивления T4 (как и SPT+) и напряжения насыщения является неизбежной платой за снижение размера кристалла.

**Таблица 6.** Сравнительные характеристики Trench 4 и SPT (номинальный ток  $I_{Cnom} = 300$  А, рабочее напряжение 1200 В)

Параметры	SPT (серия 128)	Trench 3 (серия 126)	Trench 4 (серия T4)
Напряжение насыщения $V_{CEsat}$ @ 25/125 °C, В	1,9/2,1	1,7/2,0	1,85/2,2
Энергия потерь $E_{on} + E_{off}$ @ 100 А, мДж	17,5	25,6	17,8
Заряд затвора $Q_g$ @ 100 А, нКл	1000	800	700
Относительный размер кристалла при номинальном токе, %	100	85	70
Тепловое сопротивление $R_{thjc}$ @ 100 А, °C/Вт	0,17	0,24	0,27

Ниже перечислены основные преимущества Trench 4 по сравнению с IGBT предыдущих поколений:

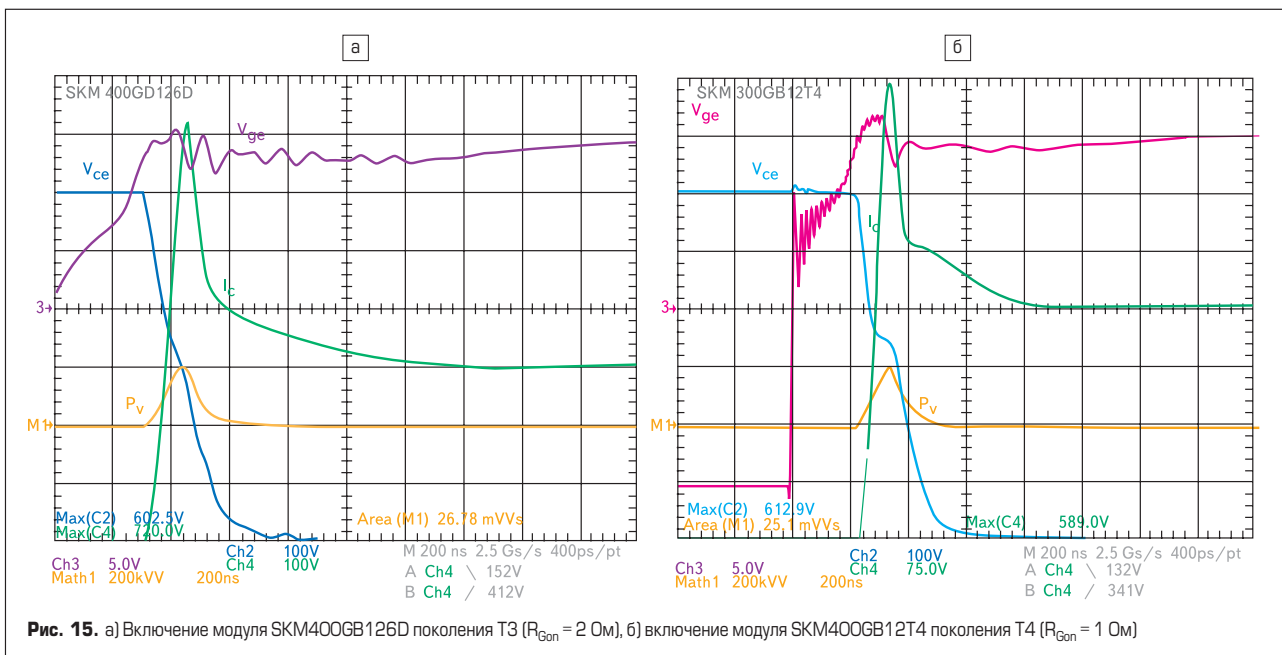
- меньше размер кристаллов;
- плотность тока повышена до 125 А/см<sup>2</sup>;
- энергия выключения снижена на 30%;
- меньше удельный заряд затвора;
- предельная температура кристалла повышена до 175 °C, увеличение запаса по предельному току на 20–25%;
- более плавный характер переключения (скорость выключения  $di/dt$  снижена примерно на 22%).

Как и SPT+, модули новой серии Trench имеют более плавный характер переключения и меньшие динамические потери, что демонстрируют эпюры, приведенные на рис. 15 и 16. Обратите внимание на то, что при вдвое мень-

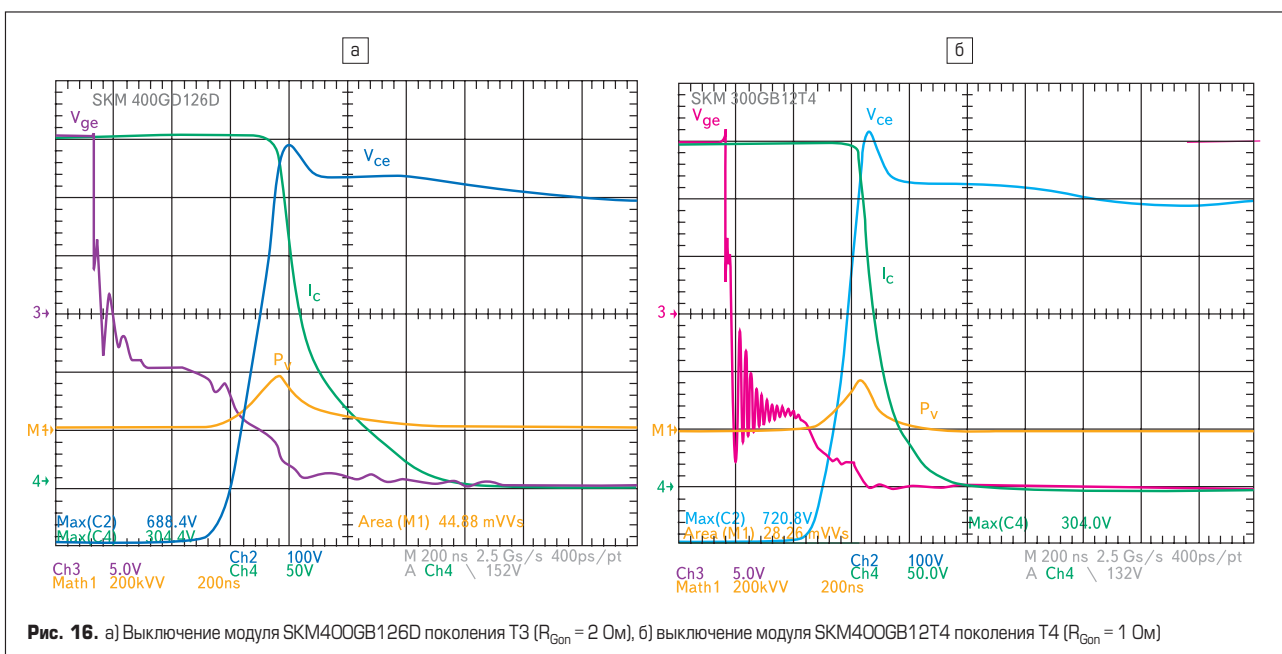
шем резисторе затвора значение энергии переключения для нового ключа оказывается ниже: энергия включения  $E_{on}$  для T4 составляет 27,5 мДж против 29 мДж, энергия выключения  $E_{off}$  — 31 мДж против 48,9 мДж для модуля серии T3. Измерения проводились при следующих режимах работы:

- напряжение на шине  $V_{DC} = 600$  В;
- ток коллектора  $I_C = 300$  А;
- макс. температура кристалла  $T_{jmax} = 125$  °C;
- скорость изменения тока  $di/dt = 6800$  А/мкс

Компоненты серии T4 с кристаллами Trench 4 IGBT будут производиться в полумостовой конфигурации GB на ток от 50 до 400 А, а в виде одиночных ключей GA — на ток 400 и 600 А. Инженерные образцы модулей SEMITRANS серии 12T4 с кристаллами Trench 4 должны быть доступны в конце 2006 года.

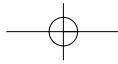


**Рис. 15.** а) Включение модуля SKM400GB126D поколения T3 ( $R_{Gon} = 2$  Ом), б) включение модуля SKM400GB12T4 поколения T4 ( $R_{Gon} = 1$  Ом)



**Рис. 16.** а) Выключение модуля SKM400GB126D поколения T3 ( $R_{Gon} = 2$  Ом), б) выключение модуля SKM400GB12T4 поколения T4 ( $R_{Gon} = 1$  Ом)





### Заклучение

Для технологов и производителей чипов термин IGBT означает единичную структурную ячейку шириной несколько микрон на кремниевом чипе. Для пользователей и разработчиков изделий силовой электроники, транзистор или модуль IGBT — это, прежде всего, силовой ключ в изолированном или неизолированном корпусе, обладающий набором определенных параметров. Кроме электрических характеристик нас интересует ОБР ключа, его надежность, устойчивость к внешним воздействиям, а также функциональная полнота, если речь идет об интеллектуальных силовых модулях.

Вопросы технологии производства чипов, как правило, интересуют только самых пытливых пользователей, однако данные проблемы все сильнее вторгаются в нашу жизнь. Например, повсеместное принятие экологических директив, в частности, отказ от применения свинца, требуют кардинального изменения многих технологических процессов. Особенно это касается тонкопленочных технологий, где необходима разработка новых материалов металлизации. Именно растущие экологические требования привели к появлению так называемых «граничных» технологий IGBT, в частности, субмикронной планарной (submicron-rule planar gate IGBT), которая, возможно, станет одной из базовых технологий будущего.

Как было сказано в начале статьи, развитие технологий IGBT идет по спирали. Вот основные этапы совершенствования этих уникальных силовых ключей:

- 1978: запатентована структура IGBT;
- 1986: разработана двухслойная эпитаксиальная технология PT-IGBT (планарный затвор DMOS);
- 1988: разработана тонкопленочная технология NPT-IGBT (*n*-подложка, планарный затвор);
- 1996: разработана технология PT-IGBT (затвор Trench);
- 1999: разработана технология Trench FS-IGBT;
- конец 1990-х: разработана технология RB-IGBT;
- 2000: разработана технология SPT-IGBT (планарный затвор);
- 2001: разработана технология PT-CSTBT (затвор Trench);
- 2004: разработана технология LPT-IGBT (LPT-CSTBT) и RC-IGBT;
- 2005/2006: разработаны технологии SPT+ IGBT (планарный затвор) и Trench 4 IGBT (затвор Trench).

Информация, представленная в статье, еще раз подтверждает наш тезис о том, что совершенствование биполярных транзисторов с изолированным затвором будет продолжено, а сам IGBT неисчерпаем как атом. До предела, означающего нулевые потери проводимости и переключения, еще далеко, и мы надеемся, что ближайшие годы принесут нам

немало интересных открытий в области технологий силовых полупроводников.

Более подробную информацию о новых поколениях модулей производства SEMIKRON можно получить на сайте компании [www.semikron.com](http://www.semikron.com) и в центрах технической поддержки компании в Санкт-Петербурге и Новосибирске.

### Литература

1. Annacker R., Hermwille M. 1200V Modules with Optimised IGBT and Diode Chips. Semikron Elektronik GmbH.
2. Li J., Hetzer R., Annacker R., Koenig B. Modern IGBT/FWD chip sets for 1200V applications. Semikron Elektronik GmbH.
3. Колпаков А. И. SEMITRANS — один в пяти лицах // Компоненты и технологии. 2003. № 8.
4. Minato T., Takahashi H. New Power-Element Technology. Mitsubishi Electric Corporation.
5. Motto E. R., Donlon J. F., Tabata M. Application Characteristics of an RB-IGBT Module. Powerex Incorporated.
6. Takahashi H., Yamamoto A., Aono S. 1200 V Reverse Conducting IGBT. Mitsubishi Electric Corporation.
7. Seng D., Wahi A. New 1200V SPT+ IGBT Chips in SEMiX Power Modules Platform. SEMIKRON International.
8. Schreiber D. Presentation Materials. SEMIKRON International.

