

IGBT/MOSFET:

ОСНОВНЫЕ КОНЦЕПЦИИ И ПУТИ РАЗВИТИЯ

Арендт Винтрих
(Arendt Wintrich)

Ульрих Николаи
(Ulrich Nicolai)

Вернер Турски
(Werner Tursky)

Тобиас Рейман
(Tobias Reimann)

Перевод и комментарии:
Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Введение

Постоянные улучшения свойств силовых кристаллов, поиск новых решений и совершенствование существующих технологических процессов приводят к непрерывным эволюционным изменениям характеристик силовых ключей. Революционные инновации связаны, в первую очередь, с внедрением новых широкозонных материалов и тонких пленок, применение которых позволяет не только повысить экономическую эффективность производственных процессов, но и создавать силовые ключи с принципиально новыми свойствами.

Характеристики «идеального» ключа, к которым стремятся производители кристаллов, подразумевают удовлетворение трем основным требованиям, показанным в виде «триады компромиссов» на рис. 1. Чтобы электронный релейный элемент мог считаться «почти идеальным», он, в первую очередь, должен иметь близкие к нулевым потери проводимости, которые определяются сопротивлением открытого канала R_{dson} для MOSFET или напряжением насыщения V_{CEsat} для IGBT. В то же время транзистор должен выдерживать высокое обратное напряжение

V_{CE} в заблокированном состоянии и генерировать минимальные потери выключения E_{off}

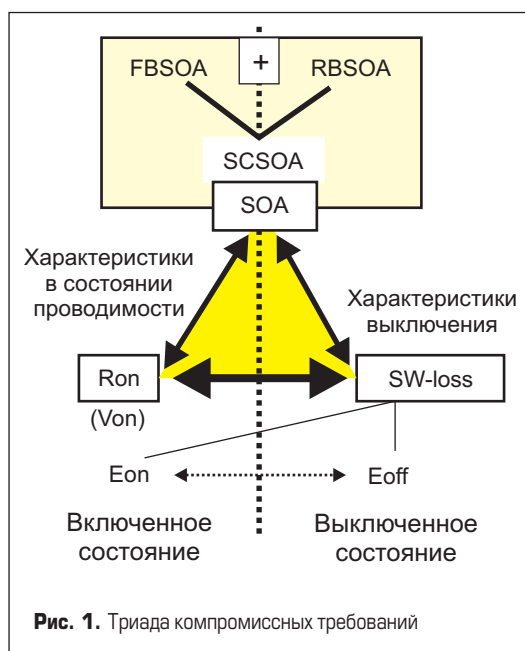
Соотношение характеристик V_{CEsat} , V_{CE} и E_{off} определяет свойства IGBT как биполярного силового ключа. Для униполярной MOSFET-структуры в качестве основного критерия используется соотношение R_{dson} и обратного напряжения V_{DSS} . Естественным третьим параметром, от которого зависит надежность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

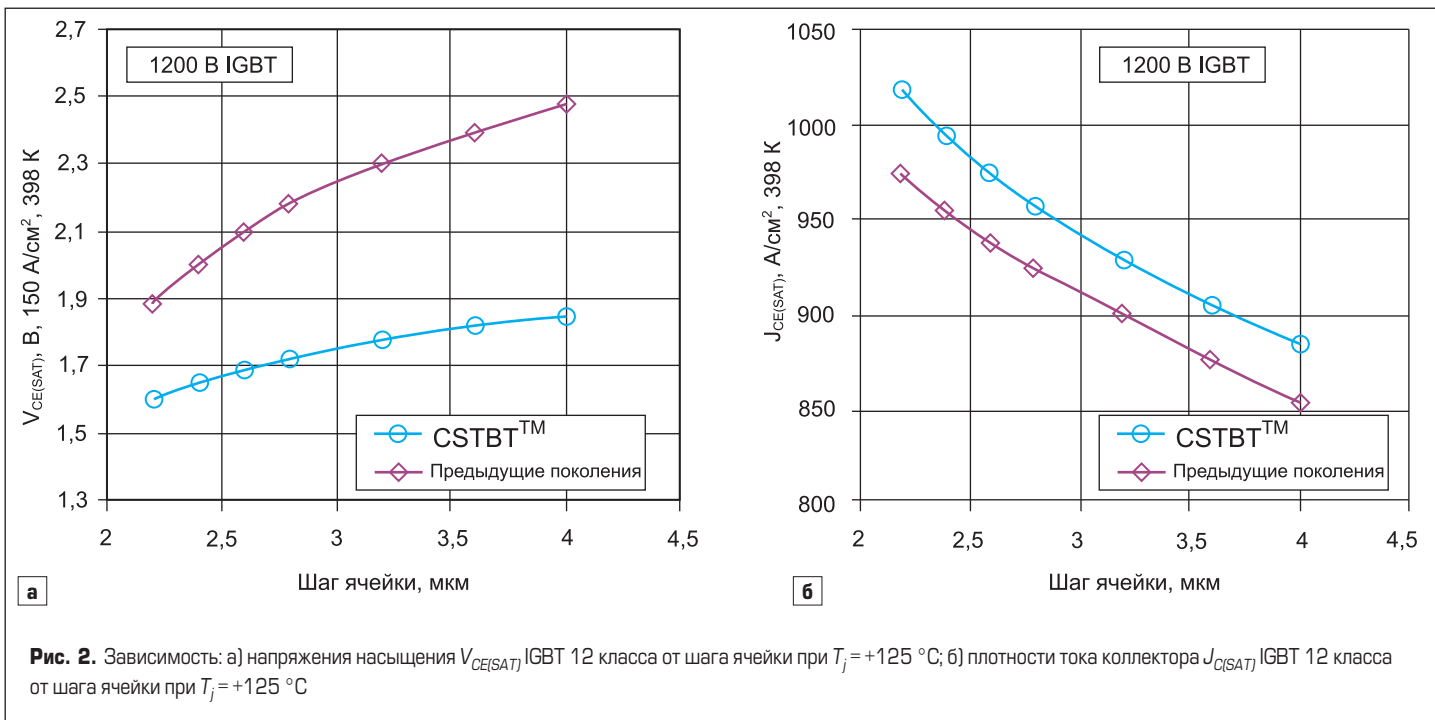
Часть 1. IGBT

С момента появления первых поколений биполярных транзисторов с изолированным затвором было разработано несколько версий этих ключей в рамках базовой структуры. Развитие технологий IGBT идет по различным направлениям, основной целью является оптимизация характеристик кристаллов для конкретных условий применения. Стремление к снижению цены и повышению плотности тока, а также постепенное приближение к физическим пределам определило три основных пути совершенствования IGBT:

- применение ячеек с тонкими структурами;
 - снижение толщины и площади кристаллов;
 - повышение рабочей температуры.
- Независимо от концепции силовой ключ должен обеспечивать наилучший баланс между основными параметрами (пример на рис. 2):
- напряжением насыщения $V_{CE(SAT)}$ и энергией потерь выключения;
 - напряжением насыщения $V_{CE(SAT)}$ и стойкостью к короткому замыканию (область безопасной работы SCSOA).

Решение первой задачи привело к разработке структур SPT+ (ABB), Trench 4 (Infineon), CSTBT (Mitsubishi), отличающихся высокой концентрацией свободных носителей заряда в зоне n эмиттера. Негативным следствием этого является повышение скорости спада тока коллектора при выключении,





приводящее к росту уровня коммутационных перенапряжений и электромагнитных помех.

Преодоление второго конфликта достигается за счет уменьшения толщины кристаллов и внедрения слабелегированных FS (Field Stop) слоев, обеспечивающих резкий спад напряженности поля. Отметим, что толщина чипов имеет ключевую связь с их свойствами. Кроме всего прочего, она определяет влияние MOS-канала на процесс модуляции проводимости. На рис. 2 на примере 1200-В Trench IGBT показано, как напряжение насыщения

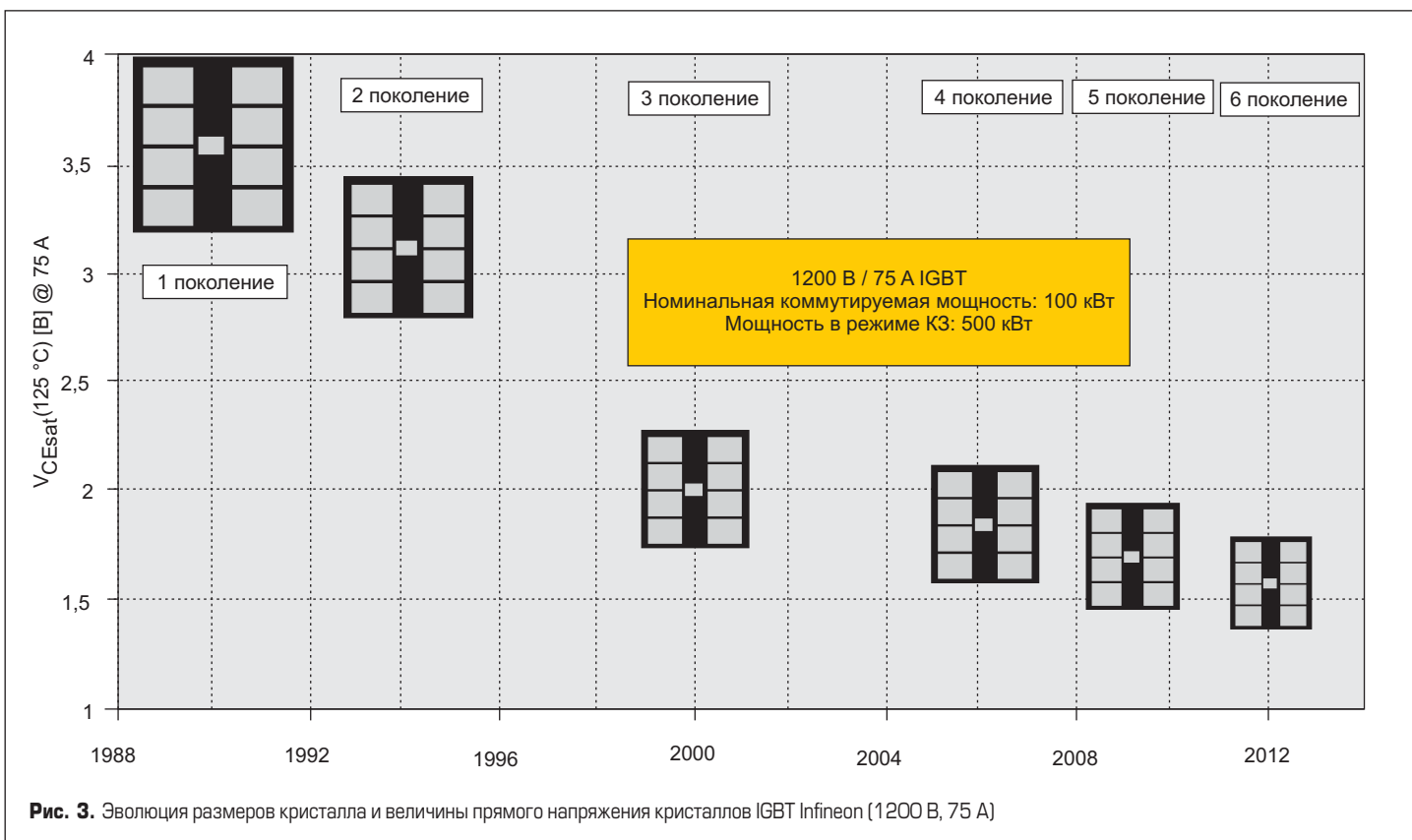
$V_{CE(sat)}$ или плотность тока коллектора $J_{CE(sat)}$ зависит от шага ячейки (расстояние между ближайшими центрами ячеек структуры затвора) при температуре чипа $T_j = +125^\circ\text{C}$.

На рис. 3 [2] представлена эволюция размеров кристаллов и величины прямого падения напряжения для различных поколений IGBT Infineon (12 класс, номинальный ток 75 А).

В условиях, когда параметры силовых ключей приближаются к своим физическим пределам, повышение нагрузочной способности и снижение стоимости системы при оптимальных условиях охлаждения достигается

путем расширения температурного диапазона. Например, для IGBT Trench 4 допустимая рабочая температура кристаллов повышена с +150 до +175 °С, у следующей генерации она может быть доведена до +200 °С. Естественно, что антипараллельные диоды и интерфейсные материалы модулей выбираются с учетом этих режимов эксплуатации.

Столь существенное ужесточение условий применения должно обеспечиваться без ущерба для надежности, что требует кардинального пересмотра конструкции силовых модулей и детального анализа свойств используемых



материалов. На рис. 4 [4] показаны основные особенности различных IGBT-структур, их подробное описание приведено в [3].

Концепция PT

В первых транзисторах, созданных по технологии PT (Punch Through), которая продолжает совершенствоваться до настоящего времени, в качестве базы использовалась p^+ -подложка, а зоны n^+ и n^- создавались путем эпитаксиального выращивания. Современные PT IGBT имеют канавочную структуру затвора (Trench-Gate), как показано на рис. 4. В состоянии прямой блокировки зона пространственного заряда включает в себя всю область n^- . Чтобы эпитаксиальный слой имел минимально возможную толщину даже при высоких обратных напряжениях, напряженность электрического поля в конце дрейфовой n^- -зоны снижается путем внедрения высоколегированной n^+ -буферной области.

Ключи PT IGBT отличаются высокой эффективностью эмиссии дырок в p^+ -слое, перемещающихся в n^- -дрейфовую область, что обусловлено малой толщиной и высокой степенью легирования подложки. Ток управления PNP-транзистора должен быть снижен соответствующей настройкой коэффициента переноса базы (n^- -дрейфовая зона, n^+ -буферная зона), что достигается за счет уменьшения срока жизни носителей заряда в n^+ -слое. Для этого увеличивается количество так называемых центров реком-

бинации путем золотого легирования или облучения пучком электронов. При этом дырочный ток составляет примерно 40–45% от общего значения.

Концепция NPT

Основой для производства NPT (Non Punch Through) транзисторов, выпускаемых всеми основными производителями силовой элементной базы, является тонкая, слаболегированная n^- -пластина. Область p^+ -коллектора создается путем обратной имплантации. В NPT IGBT дрейфовая n^- -область настолько широка, что электрическое поле в ней полностью спадает в состоянии прямой блокировки вплоть до предельно допустимого напряжения и, в отличие от PT, не может выйти за пределы этой зоны.

NPT-структура имеет очень тонкий p^+ -слой коллектора на границе области эмиттера, что обуславливает низкую эффективность эмиттера PNP субтранзистора (коэффициент инжекции $\gamma_E = 0,5$). Ее оказывается недостаточно для снижения коэффициента переноса базы за счет уменьшения времени жизни носителей. При этом дырочный ток составляет 20–25% от общего значения.

В отличие от PT IGBT напряжение насыщения NPT-ключей имеет положительный температурный коэффициент, что обеспечивает симметрию статических токов между ячейками в кристалле, а также между параллельно соединенными кристаллами и силовыми модулями. Время переключения в режиме жест-

кой коммутации NPT-транзисторов несколько ниже, чем у PT, и оно в меньшей степени зависит от температуры. Они более надежны в режимах перегрузки благодаря лучшим характеристикам «самоограничения».

Концепция SPT и SPT+

Технология SPT (Soft Punch Through), разработанная компанией ABB, представляет собой дальнейшее развитие NPT-концепции. Здесь база также представляет собой тонкую и слаболегированную n^- -пластину, а p^+ -область на коллекторе образуется путем обратной имплантации. Дополнительная p^+ -зона играет роль барьера поля или слоя FS (Field Stop), находящегося над n^+ -коллектором. Это позволяет снизить толщину дрейфового слоя (в PT-структуре эту функцию выполняет высоколегированный n^+ -буферный слой) путем ограничения электрического поля в конце n^- -дрейфовой зоны напротив области коллектора. Так как задачей данного слоя является не снижение эффективности эмиттера (как это было в случае PT IGBT), а только уменьшение напряженности поля, он менее сильно легирован, чем n^+ -буфер в PT-структуре.

При аналогичной величине блокирующего напряжения ширина w_B дрейфовой n^- -зоны у SPT может быть существенно снижена по сравнению с NPT IGBT, что позволяет уменьшить и прямое падение напряжения, пропорциональное w_B . Как и в предыдущем случае, SPT IGBT обладают положительным температурным коэффициентом прямого

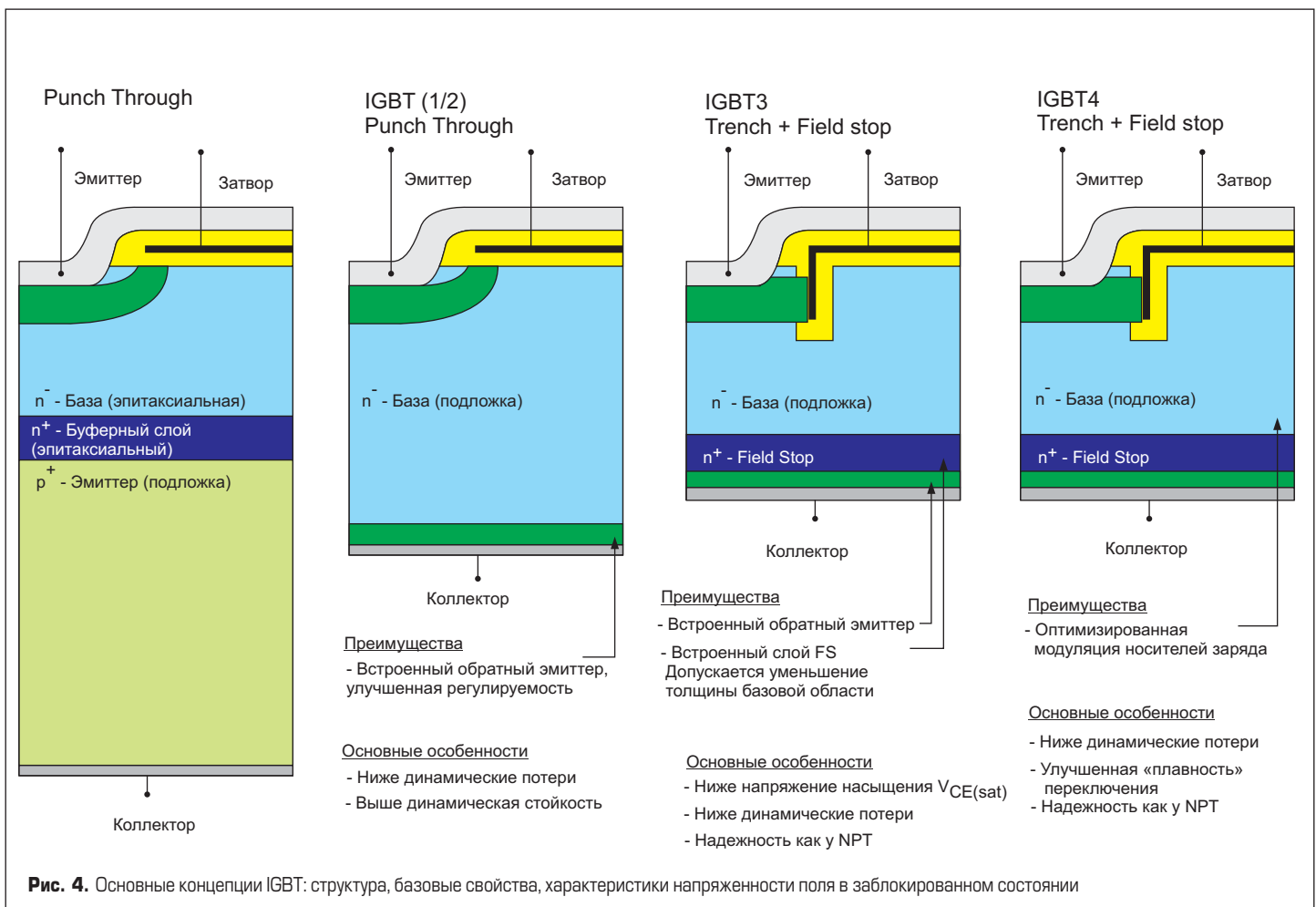


Рис. 4. Основные концепции IGBT: структура, базовые свойства, характеристики напряженности поля в заблокированном состоянии

	Punch Trough (PT)	Non - Punch Trough (NPT)	Soft Punch Trough (SPT)
Структура			
Особенности	Очень резкое выключение при высоком напряжении V_{dc} у некоторых экземпляров	Положительный температурный коэффициент прямого напряжения Очень высокая стойкость к перегрузкам	Положительный температурный коэффициент прямого напряжения Очень высокая стойкость к перегрузкам Малые потери
Технология производства	Эпитаксиальная	Зонная плавка	Зонная плавка

Рис. 5. Сравнение структуры SPT с PT и NPT IGBT

напряжения и высокой стойкостью к перегрузкам. На рис. 5 [5] показаны основные особенности технологии SPT в сравнении с PT и NPT.

Дальнейшее ее развитие — SPT+-структура (рис. 6) [6], в состав которой входит дополнительный n -слой в n -дрейфовой зоне вокруг p -канальных областей. Он создает т. н. «дырочный барьер» и препятствует утечке неосновных носителей в открытом состоянии, что повышает плотность носителей заряда и позволяет уменьшить напряжение насыщения без заметного ухудшения динамических свойств транзистора. В n/n -переходе между дрейфовой зоной и дополнительным

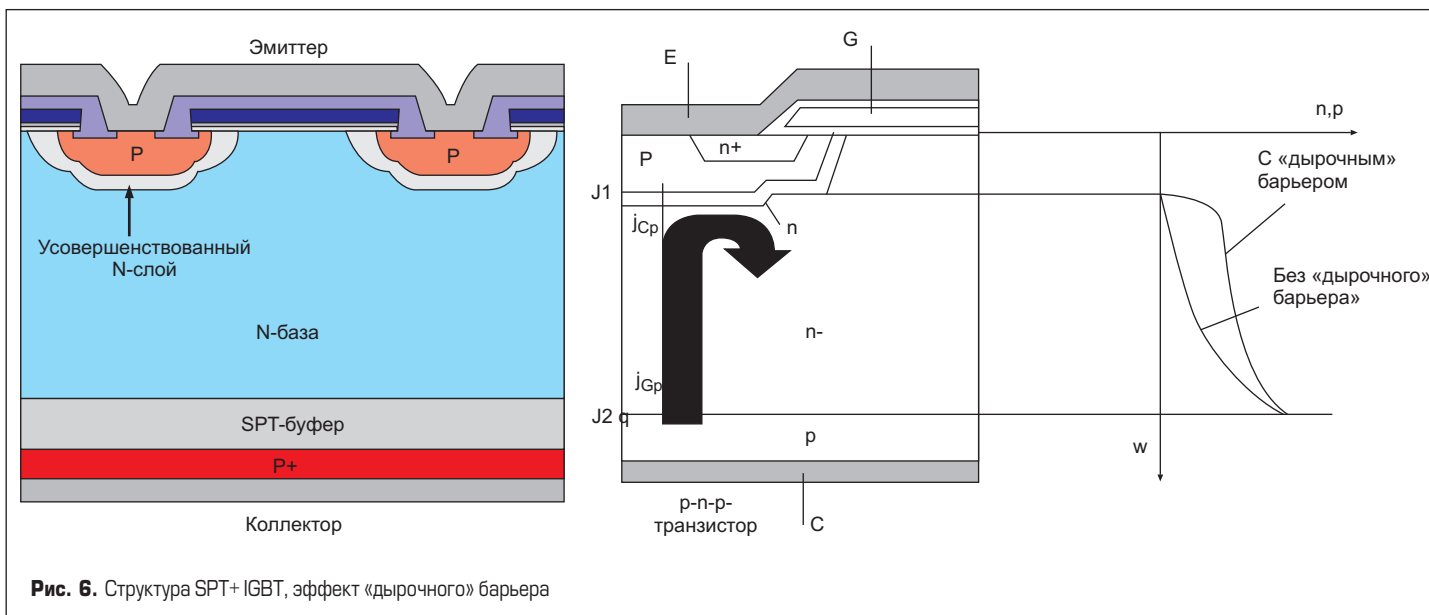
слоем присутствует диффузионное напряжение (около 0,17 В), препятствующее утечке дырок и создающее упомянутый выше барьер. Для поддержания нейтрального заряда электроны продолжают поступать из области канала, и концентрация свободных носителей возрастает.

Концепция NPT FS Trench gate (с FS-слоем и вертикальным канавочным затвором)

В таких ключах обычная NPT-структура дополнена FS-слоем, а планарный затвор заменен вертикальным канавочным (рис. 4). Как и в предыдущем случае, база представляет со-

бой тонкую, слаболегированную n -пластину, в которой на обратную сторону p^+ -коллектора имплантирован дополнительный n^+ -слой, выполняющий FS-функцию. Это позволяет уменьшить толщину дрейфовой зоны (в PT-структуре данную задачу решает высоколегированный n^+ -буферный слой) путем ограничения электрического поля в конце n -дрейфовой зоны напротив области коллектора.

Усовершенствованная структура обладает положительным температурным коэффициентом прямого напряжения и высокой стойкостью к перегрузкам. Хвостовой ток, образующийся при выключении Trench FS NPT,



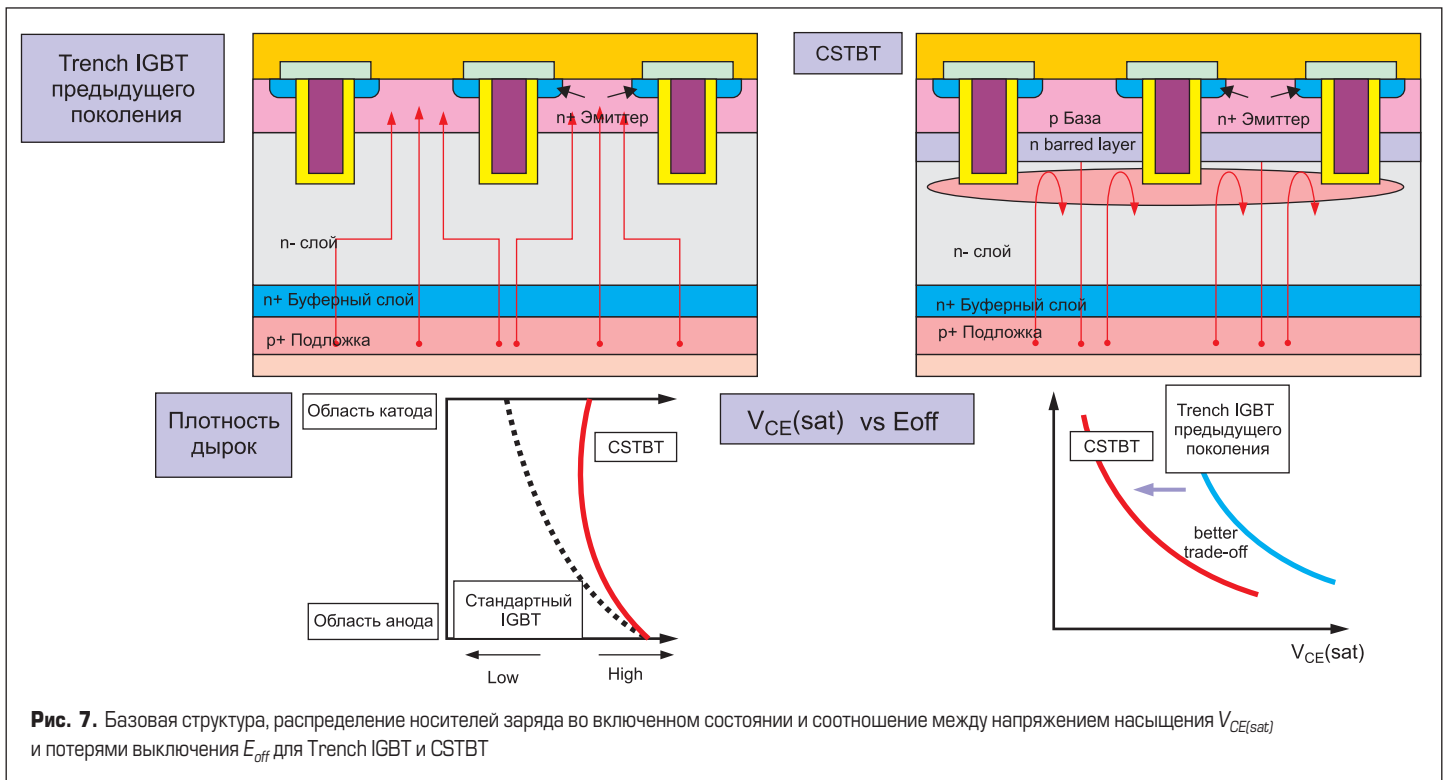


Рис. 7. Базовая структура, распределение носителей заряда во включенном состоянии и соотношение между напряжением насыщения $V_{CE(sat)}$ и потерями выключения E_{off} для Trench IGBT и CSTBT

в начальной фазе несколько выше, чем у транзистора без FS-слоя, однако спадает он быстрее.

Конструкция элементов затвора в каждой из ячеек IGBT образует вертикальные каналы в т. н. «*p*-карманах» структуры транзистора. Поскольку активная площадь кремния при этом увеличивается, то улучшается качество управления полем в поперечном сечении каналов и, соответственно, снижается их сопротивление. В рамках каждого определенного размера чипа можно продолжать уменьшение площади ячеек, поэтому IGBT с вертикальной структурой затвора имеют более высокую плотность тока и рабочее напряжение, меньшие потери проводимости и переключения, а также лучшую стойкость к зашелкиванию, чем планарные.

У последнего, четвертого поколения кристаллов (Trench 4) Infineon уменьшен шаг ячеек (т. е. расстояние между центрами элементов затворов ближайших ячеек) по сравнению с IGBT 3, соответственно и сами они стали меньше. Оптимизация структуры ячеек и снижение толщины чипов позволили улучшить статические и динамические характеристики ключей. Однако уменьшение размера кристаллов неизбежно приводит к росту контактного теплового сопротивления $R_{th(j-c)}$ или $R_{th(j-s)}$. Таким образом, улучшение электрических характеристик требует и соответствующего расширения диапазона рабочих температур: у кристаллов 4 поколения предельное значение T_{max} увеличено до +175 °C, что на 25 °C выше, чем у IGBT предыдущих поколений.

Чипы 4 поколения выпускаются в нескольких версиях, отличающихся соотношением статических и динамических параметров:

- IGBT4-T4 — низкое время коммутации (для модулей с номинальным током 10–300 А);

- IGBT4-E4 — низкие потери проводимости и переключения (для модулей с номинальным током 150–1000 А);
- IGBT4-P4 — плавный характер переключения и низкие потери проводимости (для модулей с номинальным током выше 900 А).

Концепция CSTBT

Комбинация дырочного барьера над дрейфовой зоной и канавочной структуры затвора использована в CSTBT (Carrier Stored Trench Bipolar Transistor) компании Mitsubishi (рис. 7) [7]. У этих ключей, известных ранее как IEGT (Enhanced Gated Transistors), инжекция носителей заряда *n*-эмиттером увеличена с помощью «дырочного барьера», описанного выше и использованного в SPT+-концепции. Дополнительный *n*-слой располагается внутри структуры канавочного затвора под *p*-базовой областью. Под «барьером» аккумулируются носители положительного заряда, что приводит к эффективному излучению электронов из каналов и повышает локальную концентрацию свободных носителей.

CSTBT отличается от «обычного» Trench IGBT всего одним слоем, названным Carried Stored n layer (отсюда и название транзистора). Носители *n*-типа (электроны), инжектированные каналом Trench затвора, быстро распространяются в аккумулирующем их CS-слое. Его сопротивление и, соответственно, скорость распространения носителей могут регулироваться с помощью изменения концентрации носителей. В то же время для дырок, инжектируемых *p*-коллектором, затрудняется проникновение в область *p*-базы. Это происходит потому, что высокоэнергетический барьер *p-n*-перехода, образованный 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.

Компания Mitsubishi также использовала CSTBT-концепцию и в отношении NPT-структуры, что дает возможность применять менее дорогие тонкие пластины из гомогенного *n*-кремния вместо эпитаксиальных пленок.

Технология Plugged cells

Вместо стандартной технологии сварки отдельных ячеек можно использовать метод короткого замыкания поликремния в области затвора с металлизацией эмиттера, что позволяет обеспечить дальнейшее улучшение характеристик IGBT. Увеличение объема ячейки и снижение размера *p*-областей дает возможность увеличить концентрацию носителей заряда в области эмиттера и снизить прямое падение напряжения в гораздо большей степени, чем за счет роста перепада напряжения на канале [8]. Еще одним преимуществом транзисторов с «замкнутыми ячейками» является меньший ток самоограничения в режиме КЗ по сравнению с обычными Trench IGBT.

Концепция RC-IGBT

Над IGBT-кристаллами, способными проводить одинаковый ток в обоих направлениях (в транзисторном и диодном режиме), работает большинство производителей. Подобные ключи получили название RC IGBT (Reverse Conducting IGBT) или IGBT с реверсивной проводимостью.

Диоды, используемые в IGBT в качестве антипараллельных (FWD), имеют хорошие

динамические свойства и характеристики восстановления. Однако они являются достаточно дорогими элементами, их производство требует существенных затрат. Гибридные диоды обладают следующими преимуществами:

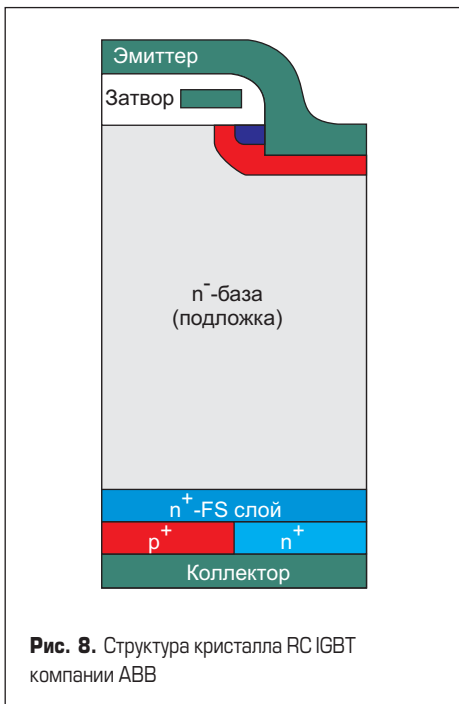
- более эффективное использование площади модуля;
- лучшие перегрузочные характеристики;
- более симметричное распределение токов при параллельном соединении;
- улучшенное соотношение тепловых сопротивлений $R_{th(j-c)}$ диода и транзистора;
- меньшие пульсации температуры кристалла.

К недостаткам технологии RC-IGBT можно отнести тот факт, что потери IGBT и диода создаются одним кристаллом, кроме того, здесь требуются значительные технологические усилия для контроля процесса обратного восстановления.

Внедрение диода в состав чипа стандартного PT или NPT IGBT является сложной технологической задачей, требующей 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, были изготовлены компанией Mitsubishi на основе LPT-структуры.

На рис. 8 [9] показана базовая концепция RC-IGBT компании ABB, выполненная с использованием SPT-концепции. Реверсивная проводимость обеспечивается интегрированным MOSFET, выполняющим функцию обратного диода. Он образуется внесением n^- -элементарных слоев в область p^+ -коллектора. В качестве анода диода используется p -базовая область IGBT.

Инжекция дырок из зоны p^+ -коллектора должна обеспечиваться и при малых уровнях токов и напряжений. Существуют различные технологические приемы, позволяющие сни-



зить потери выключения, получить плавный характер переключения во всем диапазоне рабочих температур и исключить защелкивание. Для решения этой задачи необходимо задать очень точный профиль легирования областей p -эмиттера и p^+/n^+ -коллектора. В ячейках в данном случае используются не высоколегированные p^+ -зоны, а тонкие p -структуры, что позволяет снизить эффективность инжекции.

Локальный контроль носителей p -зарядов посредством имплантации или облучения протонами позволяет снизить потери выключения E_{off} диодов без ухудшения блокирующей способности и динамических характеристик IGBT. Еще одним способом уменьшения E_{off} является применение так называемых MOS-контролируемых диодов (Bimode Insulated Gate Transistor, BIGT).

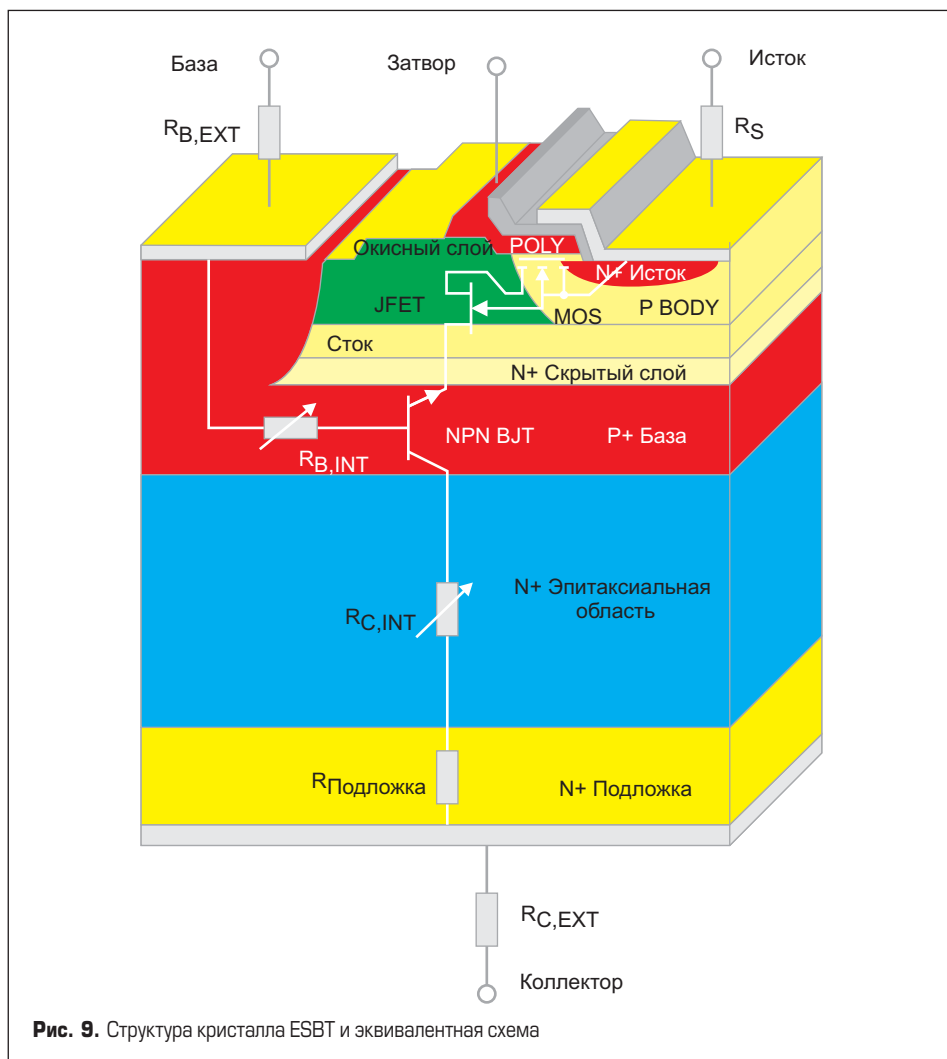
На сегодня в производстве находятся RC-IGBT с рабочим напряжением 600–3300 В. Их совершенствование непрерывно продолжается, и главной задачей на этом пути является улучшение характеристик выключения. Сравнение прямых характеристик обычных NPT и RC-IGBT показывает, что при одинаковых условиях работы напряжение насыщения кристаллов с обратной проводимостью выше примерно на 0,4 В в области номинальных токов. Увеличение потерь проводимости является неизбежной платой за усложнение структуры кристалла.

Одним из важнейших критериев, определяющих качественные показатели ключа, является соотношение статических потерь и энергии выключения. Комплексная предварительная оценка показывает, что, несмотря на большие потери проводимости, RC-IGBT выигрывает у NPT-IGBT по соотношению V_{CEsat} и E_{off} . Однако ток обратного восстановления I_{rr} внутреннего диода RC-IGBT заметно превышает показатели FWD NPT-IGBT в аналогичных условиях. Причиной этого является высокая неконтролируемая концентрация примесей в области базы.

В 2013 г. компанией ROHM были представлены новейшие SiC MOSFET 12 класса с номинальным током 180 А, в которых функцию FWD выполняет внутренний диод MOSFET. При этом в нем полностью подавлен эффект «биполярной деградации», а энергия обратного восстановления существенно меньше, чем у обычных MOSFET и IGBT аналогичного токового класса. Возможно, что в ближайшем будущем технология карбида кремния (SiC) станет основной при производстве низковольтных ключей с функцией обратной проводимости.

Концепция ESBT

Биполярный транзистор с коммутируемым затвором (Emitter Switched Bipolar Transistor, ESBT) (рис. 9) [10] не является IGBT в привычном понимании этого слова. Он представляет



собой монолитную каскадную схему, состоящую из NPN- и MOSFET-частей, изначально разработанную для применения в преобразователях, работающих на больших напряжениях и частотах коммутации.

Каскады, объединяющие низковольтный MOSFET и высоковольтный биполярный транзисторы, начали использоваться в дискретных и гибридных полупроводниковых компонентах в 80-х годах. «Полевая» часть ключа соединена последовательно с цепью эмиттера NPN. Во включенном состоянии оба транзистора полностью контролируются, таким образом, падение на открытом ESBT является суммой прямых напряжений полевой и биполярной частей.

ESBT управляется по затвору MOSFET, при этом база NPN-транзистора постоянно соединена с источником напряжения через резистор. При выключении полевой транзистор открывает эмиттерную цепь NPN и его коллекторный ток начинает течь через базу к источнику управляющего напряжения до тех пор, пока все носители заряда в биполярной структуре не рекомбинируют и ток коллектора не прекратится.

Поскольку при выключении эмиттер «отсоединяется» посредством полевого транзистора, полностью исключается риск вторичного пробоя биполярной структуры. По сравнению с процессом нормальной коммутации

базовый ток здесь выходит за лимиты RBSOA и отключение транзистора возможно только в пределах ограниченного значения V_{CBO} коллекторно-базового диода. Управление по затвору MOSFET при этом осуществляется достаточно низким напряжением, что снижает требования к драйверу.

Литература

1. Arendt Wintrich, Ulrich Nicolai, Werner Tursky, Tobias Reimann. Application Notes for IGBT and MOSFET modules. SEMIKRON International. 2010.
2. Bayerer R. Higher Junction temperature in Power Modules – a demand from hybrid cars // PCIM Europe. Conference Proceedings. 2008.
3. Lutz J. Halbleiter-Leistungsbaulemente: Physik, Eigenschaften, Zuverlässigkeit // Springer Verlag Berlin Heidelberg. 2006.
4. Rusche W. Die vierte IGBT-generation. Modern IGBT ermöglichen Energieeinsparungen bei industriellen Anwendungen. www.elektroniknet.de.
5. Dewar S., Linder S. Soft Punch Through (SPT) – Settling new Standards in 1200 V IGBT // PCIM Europe. Conference Proceedings. 2006.
6. Cammarata M., Kopta A. 1200 V SPT+ IGBT and diode Chip-Set for High DC-link Voltage Application // PCIM Europe. Conference Proceedings. 2009.
7. IGBT Modules Application Note: The 5th generation IGBT Chip // Mitsubishi. 12/2007.
8. Takeda T., Kuwahara M., Kamura S. 1200 V trench gate NPT-IGBT (IEGT) with excellent low on-state voltage // ISPSD. Conference Proceedings. 1998.
9. Eckel H.-G. Potential of Reverse Conducting IGBT in Voltage Source Inverters // PCIM Europe. Conference Proceedings. 2009.
10. Buonomo S., Crisafulli V. ESBT technology in Industrial Converters: The Best Way to Cut Your Losses // PCIM Europe. Conference Proceedings. 2008.
11. Kapels H., Schmitt M., Kirchner U. New 900 V Class for Junction Devices – A New Horizon for SMPS and Renewable Energy Application // PCIM Europe. Conference Proceedings. 2008.
12. Stengl J.P., Tihanyi J. Leistung-MOSFET-Praxis // Plaum verlag Munich. 2nd edition. 1992.
13. Gillberg J. Mixed Signal and Power Integration Packaging Solutions // Bodo's Power Systems. 10/2009.
14. Lutz J., Reimann T. Advanced design with MOSFET and IGBT Power Modules // PCIM Europe. Conference Proceedings. 2007.
15. Siemieniec R., Hirler F., Geissler D. Space-saving edge-termination structures for vertical charge compensation devices // EPE. Conference Proceedings. 2009.