

Advanced Trench HiGT IGBT с разделенным p -слоем

для улучшения управляемости и устойчивости
к нежелательным, но возможным воздействиям

В статье рассматривается структура чипа Advanced Trench HiGT (IGBT с высокой проводимостью), представлены характеристики новых Advanced Trench HiGT-модулей с рабочим напряжением 1700 В. Особенностью новой структуры является глубокий, выполненный отдельно от затвора плавающий p -слой, который, благодаря такому исполнению, оказывает значительно меньшее влияние на пазы затвора и на характеристику переключения, что значительно облегчило управление модулем со стороны затвора. Новый модуль при экспериментальной проверке продемонстрировал при включении снижение на 25% скорости нарастания dV/dt при тех же самых потерях, как и у прототипа такого модуля с пазовым затвором, но по технологии trench HiGT. Кроме того, подтверждено снижение скорости dV/dt и при выключении транзистора, достаточно широкая область безопасной работы SOA (Safety Operation Area) и устойчивость к коротким замыканиям третьего типа.

Т. Араи (T. Arai)

taiga.arai.ub@hitachi.com

С. Ватанабе (S. Watanabe)

К. Ишибаши (K. Ishibashi)

Ю. Тойода (Y. Toyoda)

Т. Ода (T. Oda)

К. Сайто (K. Saito)

М. Мори (M. Mori)

Перевод: Владимир Рентюк

Введение

Биполярные транзисторы с изолированным затвором (Insulated-Gate Bipolar Transistor, IGBT) широко используются в различных системах преобразования электроэнергии (инверторах), а также в блоках питания и системах электроприводов. В соответствии с последними тенденциями в области развития силовой электроники транзисторы этого типа были значительно улучшены. Современные IGBT выпускаются как с планарными МОП-затворами (МОП-затвор — изолированный затвор типа металл-окисел-полупроводник), так и с МОП-затворами в виде паза (*trench* — «паз»). Последние используются в миниатюрных устройствах и предназначены, в основном, для работы при средних уровнях рабочего напряжения и высокой плотности тока.

На рис. 1 показаны различные поколения Trench IGBT от Hitachi. Компания разработала IGBT-приборы типа Trench HiGT, обладающие низкими потерями при сохранении высокой устойчивости к нежелательным, но возможным при работе IGBT воздействиям [1]. Этот тип IGBT имеет МОП-затвор в виде паза с различными интервалами и сформированными плавающими p -слоями без подключения к эмиттерному электроду между пазами МОП-затворов. Уменьшение числа

МОП-каналов в этой структуре снижает плотность тока насыщения $J_{c(sat)}$, что обеспечивает устойчивость к возможному короткому замыканию. Кроме того, напряжение насыщения такого IGBT в открытом состоянии оказывается ниже, что, соответственно, уменьшает рассеивание им мощности и вызванные этим потери. Это происходит из-за того, что большинство активных носителей остаются преимущественно в области диффузного слоя n .

Также Hitachi выпустила структуры Trench HiGT с технологией LiPT (Low Injection Punch Through — слабо инжектированный Punch-Through; Punch-Through — смыкание p - n -перехода, технология PT), обладающие еще меньшими потерями [2]. Инжекция небольшого количества дырочных носителей из p -слоя на стороне коллектора уменьшает токовый хвост во время выключения. Это позволяет уменьшить потери без обычной в этих случаях зоны управляемого времени жизни носителей (lifetime control).

В настоящее время облегчение управляемости по скорости нарастания dV/dt требуется для того, чтобы уменьшить потери, генерацию помех и обеспечить требования по электромагнитной совместимости (ЭМС), исключить короткие выбросы напряжения и прочие факторы, которые смогут привести к повреждениям основной схемы. Так, например, высокая скорость нарастания dV/dt приводит к деградации изоляции обмоток мотора¹. Поскольку транзисторы могут быть использованы в соответствии с верхним пределом dV/dt , они могут быть весьма полезны при разработке

¹ Параметр dV/dt относится к динамическим характеристикам. Большая скорость переключения IGBT (высокое значение dV/dt) приводит к возникновению тока в цепи затвора. При высокой скорости переключения этот ток будет протекать через емкость Миллера, расположенную между коллектором и затвором транзистора. Данный эффект способен вызвать ложное открытие IGBT, что, в случае с полумостовой или мостовой схемой включения, может вызвать отказ транзисторов из-за возникновения сквозного тока через верхний и нижний транзисторы плеча.

устройств с IGBT, что позволяет легко управлять dV/dt в широком диапазоне с более низкими потерями. Некоторые исследования и контрмеры по этому вопросу представлены в [3, 4]. В настоящее время компания производит самые современные транзисторы типа Trench HiGT, которые имеют новую структуру чипа, позволяющую реализовать высокую управляемость по dV/dt , сохраняя при этом низкие потери.

Структура транзистора

Структура чипа типа Trench HiGT показана на рис. 1 и 2. Плавающий p -слой обычного Trench HiGT IGBT несколько отделен от паза затвора, что позволяет более легко контроли-

ровать скорость включения dV/dt . Он также формируется глубже, что позволяет с малыми потерями сохранить устойчивость транзистора к возможным нежелательным воздействиям. В режиме переключения IGBT возникают флуктуации напряжения в плавающем p -слое, которые вызваны изменением напряжения коллектора. Все это непосредственно приводит к неуправляемости затвора, особенно в случае обычного Trench HiGT IGBT, в котором плавающий p -слой контактирует с пазом затвора.

С другой стороны, в случае Advanced Trench HiGT пазы затвора отделены от плавающих p -слоев таким образом, что эти флуктуации напряжения плавающего p -слоя уже не оказывают влияния на управляемость по затвору.

Кроме того, технология Advanced Trench HiGT обеспечивает низкие напряжения в открытом состоянии, как и у обычных Trench HiGT IGBT из-за их композиции плавающих p -слоев. Инженеры Hitachi также смогли найти оптимальные глубину плавающих p -слоев и расстояние между пазами затвора и отделенным от затвора плавающим p -слоем для поддержания высокого напряжения блокировки и предохранения от повреждений паза затвора.

Управляемость по скорости нарастания dV/dt

Приведем данные измерений, связанные с управляемостью Advanced Trench HiGT IGBT по скорости нарастания dV/dt в режиме включения, при обратном восстановлении и его выключении.

Режим включения и обратное восстановление

Рис. 3 демонстрирует компромисс между максимальной скоростью обратного восстановления dV_{ka}/dt (анод-катод защитного диода) при $+25^\circ\text{C}$, $I_c = 0 \sim 150$ А/чип и E_{on} при $+125^\circ\text{C}$, $I_c = 150$ А/чип (чип рассчитан на 150 А). Здесь экспериментально подтверждается то, что технология Advanced Trench HiGT предлагает лучший компромисс,

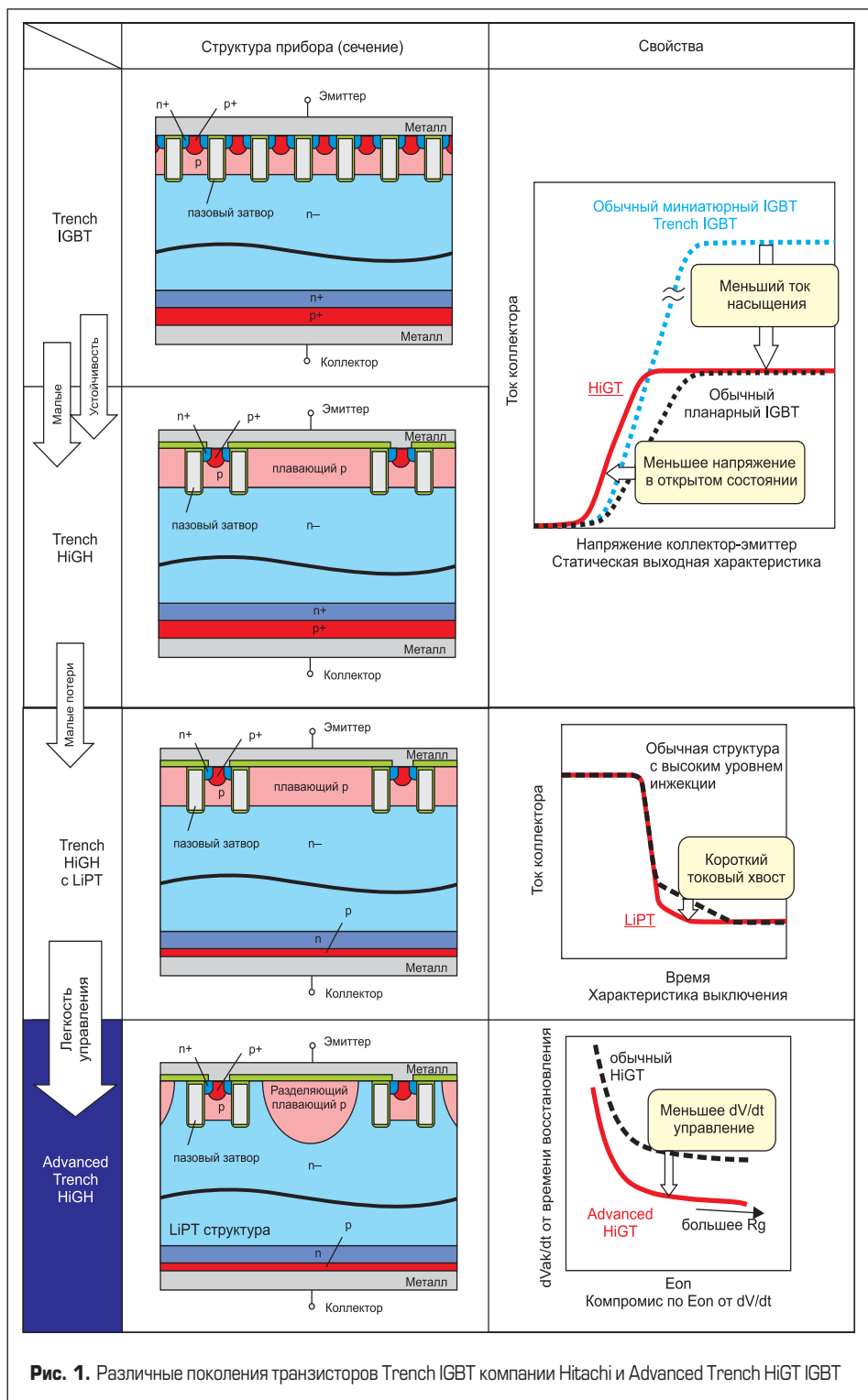


Рис. 1. Различные поколения транзисторов Trench IGBT компании Hitachi и Advanced Trench HiGT IGBT

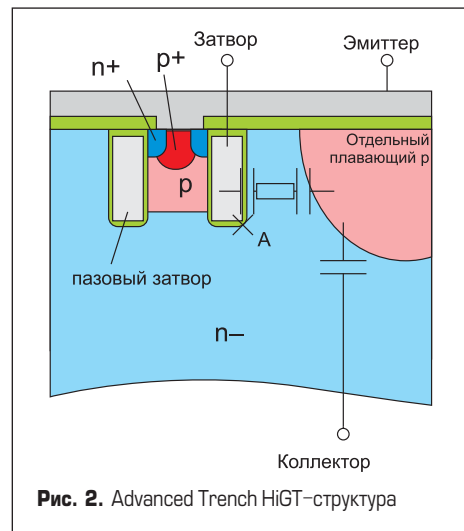


Рис. 2. Advanced Trench HiGT-структура

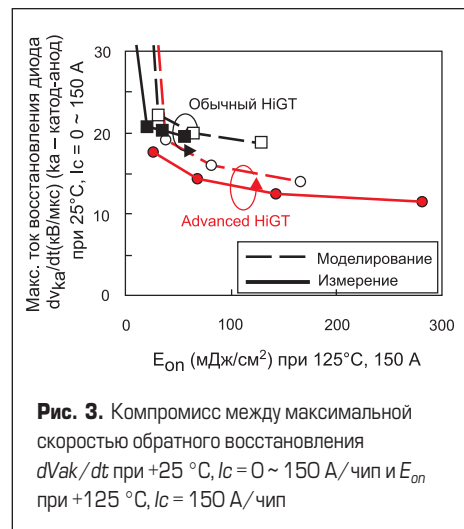


Рис. 3. Компромисс между максимальной скоростью обратного восстановления dV_{ka}/dt при $+25^\circ\text{C}$, $I_c = 0 \sim 150$ А/чип и E_{on} при $+125^\circ\text{C}$, $I_c = 150$ А/чип

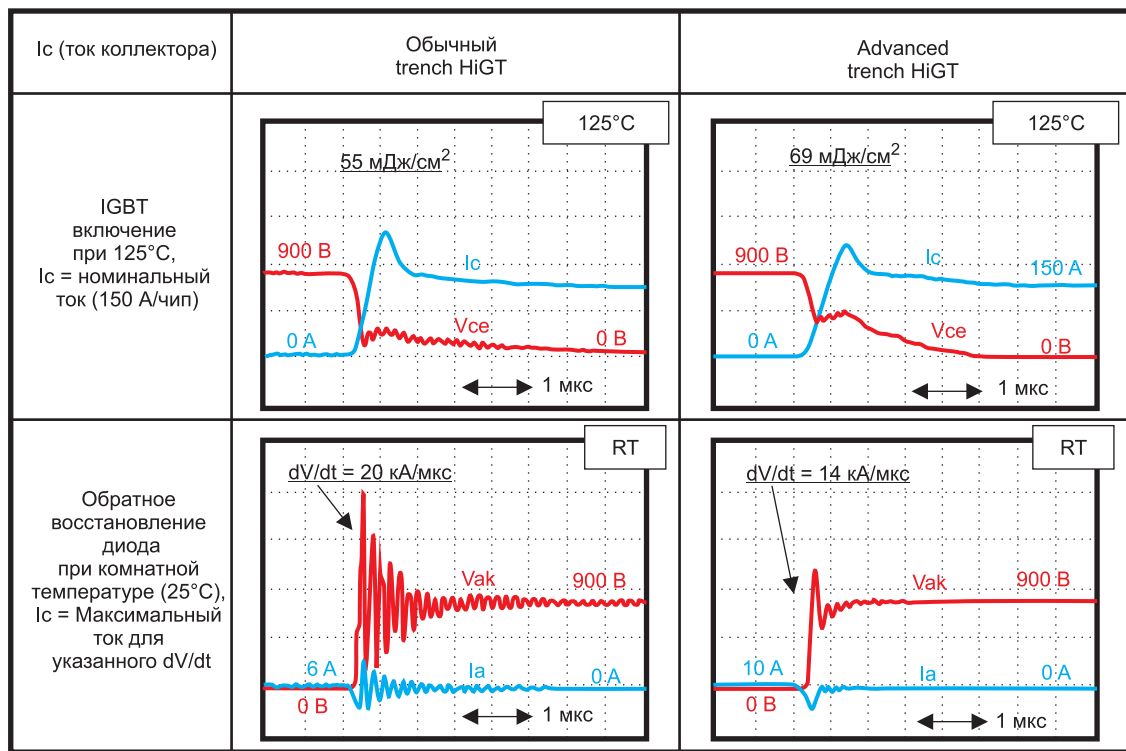


Рис. 4. Временная диаграмма переключения чипа обычного Trench HiGT IGBT и Advanced Trench HiGT

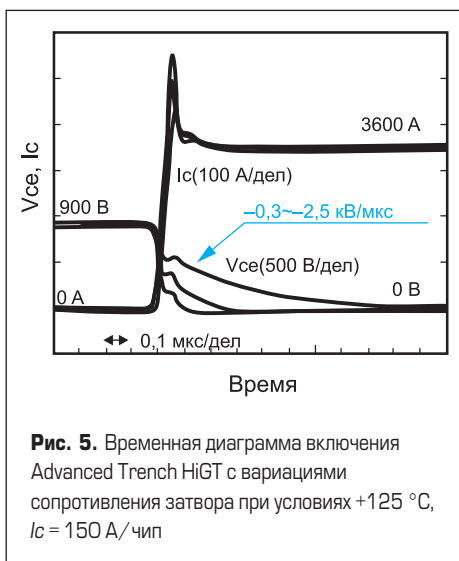


Рис. 5. Временная диаграмма включения Advanced Trench HiGT с вариациями сопротивления затвора при условиях +125 °С, Ic = 150 А/чип

чем обычная Trench HiGT, как это и демонстрируют результаты моделирования. Приборы технологии Advanced Trench HiGT показывают снижение скорости включения dV/dt на 25% по сравнению с обычными IGBT, сохраняя при этом потери на том же самом низком уровне. Кроме того, скорость переключения Advanced Trench HiGT может быть настроена и снижена до 13 кВ/мкс (для обычных приборов технологии Trench HiGT характерно значение 19 кВ/мкс).

На рис. 4 показана временная диаграмма переключения чипа обычного Trench HiGT IGBT и Advanced Trench HiGT. Временная диаграмма, представляющая время обратного восстановления диода при пониженном токе для обычного Trench HiGT IGBT, показана с максимальной скоростью dV/dt , которая равна 20 кВ/мкс, с наличием явно выраженной паразит-

ной высокочастотной затухающей генерации на фронтах импульсов напряжения, называемой «звоном» напряжения, но для IGBT, выполненных по технологии Advanced Trench HiGT, этот максимум скорости нарастания dV/dt составляет 14 кВ/мкс и, как мы видим, уже без наличия паразитного «звона».

На рис. 5 приведена временная диаграмма включения Advanced Trench HiGT с вариациями сопротивления затвора при $I_c = 150$ А/чип, +125 °С. Как видно из приведенных результатов измерения, Advanced Trench HiGT, используя соответствующее сопротивление затвора, является управляемым по скорости нарастания dV/dt в пределах между 0,3 и 2,5 кВ/мкс.

Приведенные результаты экспериментально подтвердили, что Advanced Trench HiGT IGBT, используя установки сопротивления затвора, являются легко управляемыми в широком ди-

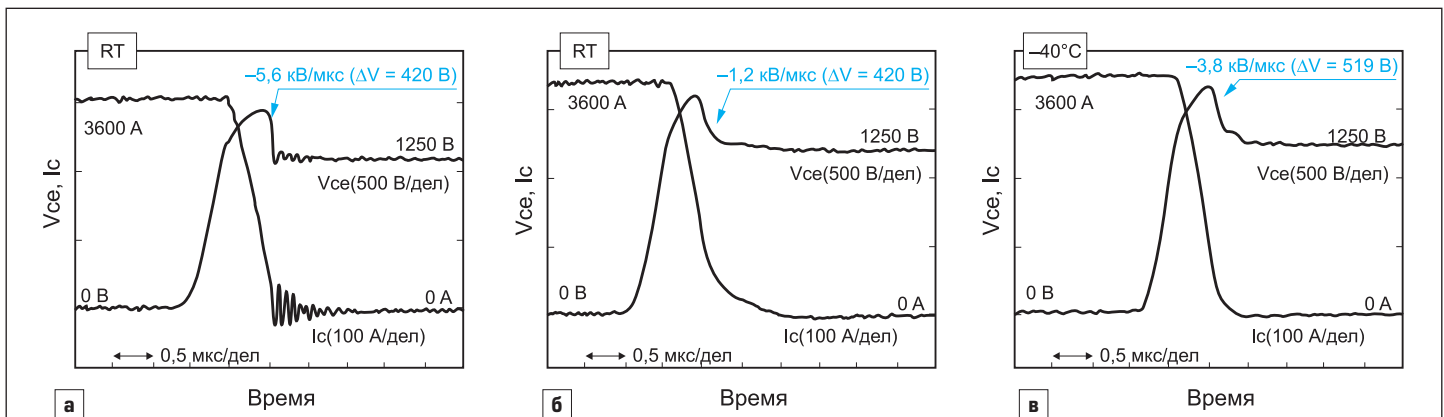


Рис. 6. Диаграммы выключения Advanced Trench HiGT-модуля 1700 В/3600 А при условии $V_{cc} = 1250$ В, $I_c = 3600$ А, $L_s = 55$ нГ, $V_{ge} = +15/-15$ В, $R_{g(off)} = 1,5$ Ом: а) обычный Trench HiGT-модуль, выполненный на чипе толщиной 20 мкм, +25 °С; б) Advanced Trench HiGT-модуль, +25 °С; в) Advanced Trench HiGT-модуль, -40 °С

апазоне скоростей dV/dt в режиме включения и обратного восстановления.

Управление скоростью выключения dV/dt

На рис. 6 показаны диаграммы выключения Advanced Trench HiGT-модуля 1700 В/3600 А при условии $V_{cc} = 1250$ В, $I_c = 3600$ А, $+25$ °С. По сравнению с результатами моделирования, диффузный n -слой на 20 мкм толще. Сигнал (рис. 6б) такого измененного модуля уже не имеет «звона» напряжения. На рис. 6в показан сигнал выключения Advanced Trench HiGT, измеренный при температуре -40 °С. Эти результаты экспериментально подтвердили, что такой модуль имеет скорость спада dV/dt , равную 3,8 кВ/мкс, и не имеет «звона» напряжения при -40 °С.

На рис. 7 показана зависимость скорости выключения dV/dt от тока коллектора I_c для Advanced Trench HiGT-модуля 1700 В/3600 А при условиях $V_{cc} = 1250$ В, $+25$ °С. По всему диапазону измерения тока коллектора Advanced Trench HiGT IGBT с настроенной толщиной (как указано выше) имеет свойственный ему уровень скорости напряжения dV/dt при запираии ниже, чем обычный по технологии Trench HiGT с предварительной настройкой толщины.

Устойчивость к возможным нежелательным воздействиям

Для новой структуры необходимо рассмотреть вопрос возможного блокирующего повреждения, которое может возникнуть вокруг пазового затвора. На рис. 8 показаны результаты моделирования распределения потенциала вокруг паза затвора в ответ на блокирование постоянного тока. Из результатов моделирования устройства видно, что дно паза (точка А на рис. 2) является точкой пробоя. Поэтому мы пошли двумя путями. Во-первых, более глубокий плавающий p -слой является достаточно эффективным в снижении напряженности электрического поля на основании паза, а во-вторых, мы смогли реализовать это в конструкции чипа с разделением между пазом затвора и отделенным от затвора плавающим p -слоем.

На рис. 9 показан результат моделирования взаимосвязи между статическим напряжением лавинного пробоя и размером элементарной ячейки IGBT. Соотношение между размером элементарной ячейки IGBT и расстоянием между пазом затвора и плавающим p -слоем носит линейный характер. Из этого результата моделирования следует, что Advanced Trench HiGT IGBT могут быть разработаны с более высоким напряжением лавинного пробоя, чем обычные Trench HiGT. Экспериментально подтверждено, что Advanced Trench HiGT-модуль свободен от таких блокировок по постоянному току (DC blocking), как блокирование «коллектор-эмиттер» и «затвор-эмиттер».

На рис. 10а показана временная диаграмма выключения в режиме большого тока модулем Advanced Trench HiGT на 1700 В/3600 А, на рис. 10б — временная диаграмма обратного восстановления в режиме выключения большого тока модулем Advanced Trench

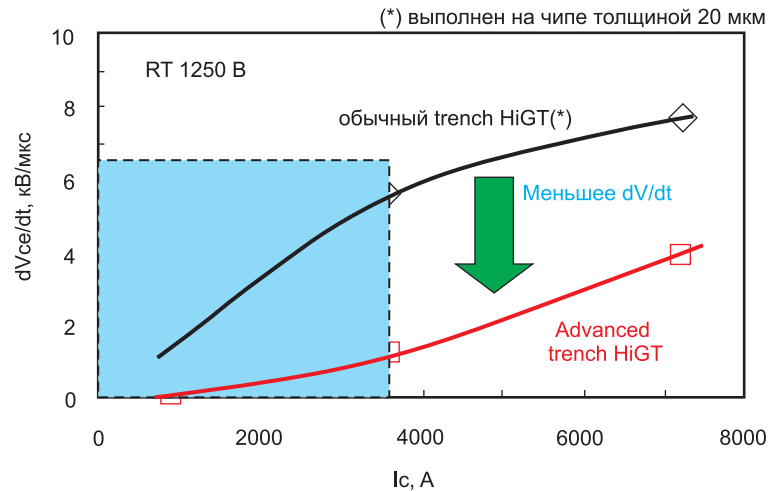


Рис. 7. Зависимость скорости выключения dV/dt от тока коллектора I_c для Advanced Trench HiGT-модуля 1700 В/3600 А при условиях $V_{cc} = 1250$ В, $I_c = 3600$ А, $L_s = 55$ нГ, $V_{ge} = +15/-15$ В, $R_{g(off)} = 1,5$ Ом, $+25$ °С

HiGT на 1700 В/3600 А. Экспериментально подтверждено, что область безопасной работы RBSOA (Reverse Bias Safe Operating Area — область безопасной работы в выключенном состоянии с обратным смещением) и область безопасной работы восстановления (обратно-го диода) SOA Advanced Trench HiGT модуля являются достаточно большими.

На рис. 11 приведена временная диаграмма для режима короткого замыкания третьего типа для Advanced Trench HiGT-модуля 1700 В/3600 А. В течение короткого замыкания третьего типа, в то время как в двухуровневых инверторах с индуктивной нагрузкой основной ток течет обратно через защитный диод, IGBT пробивается и имеет

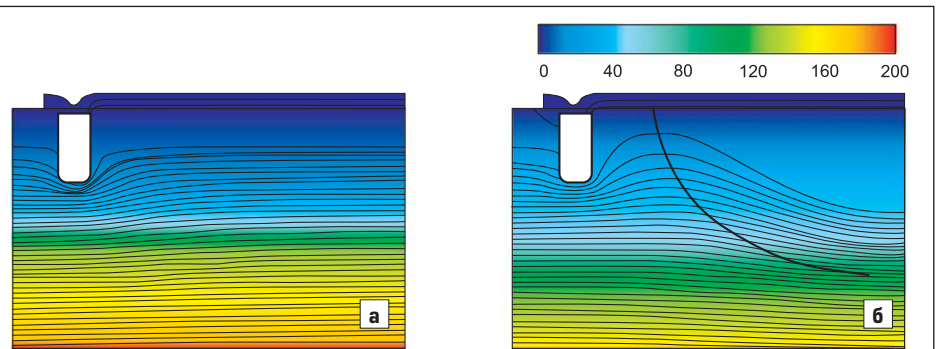


Рис. 8. Распределение потенциала в области пазового затвора при отсутствии постоянной составляющей (моделирование DC blocking) при условии $V_{ce} = 1700$ В, $V_{ge} = 0$ В, $+25$ °С: а) обычный Trench HiGT; б) Advanced Trench HiGT

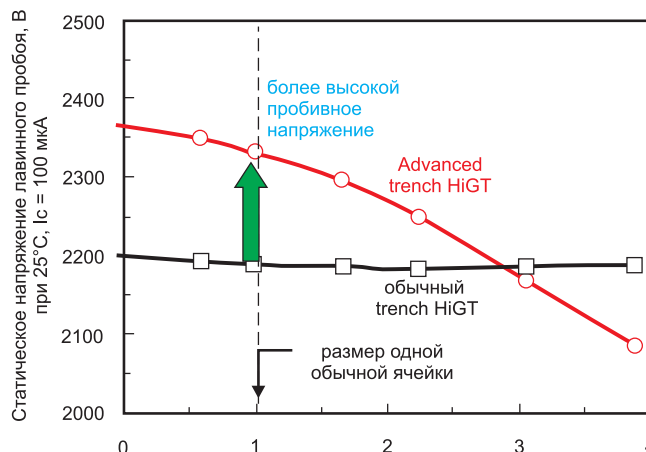
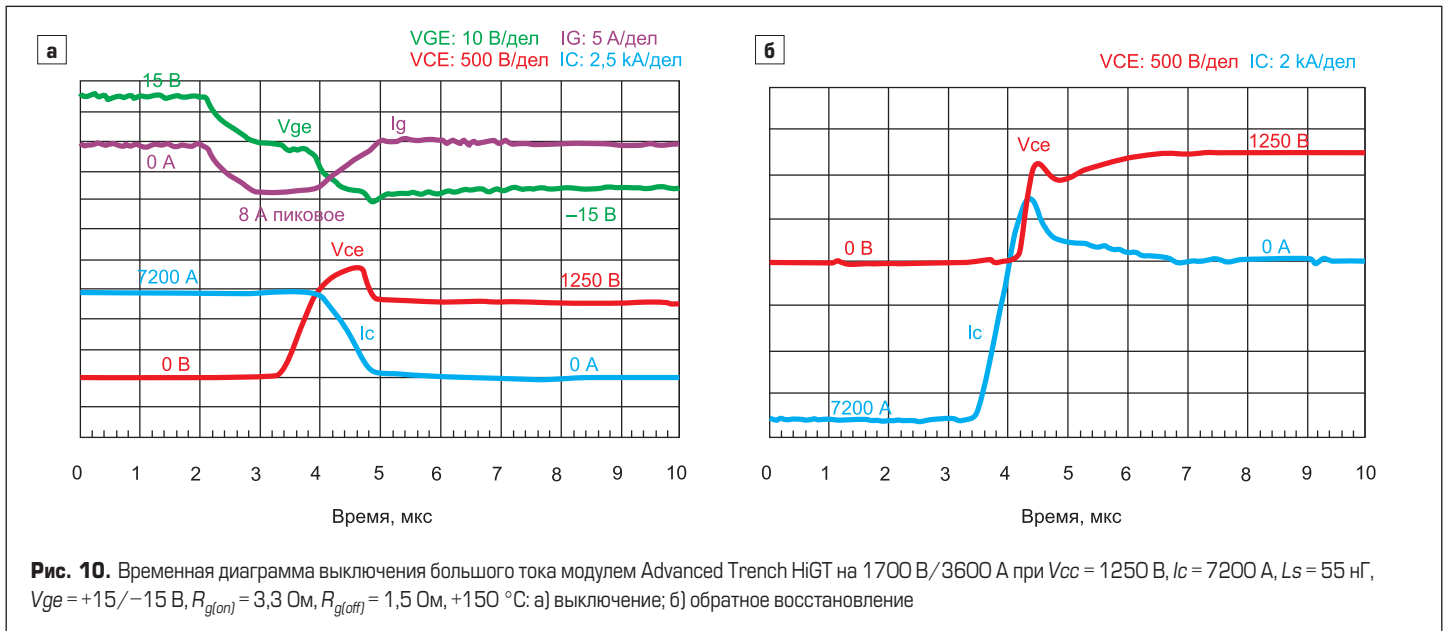


Рис. 9. Статическое напряжение лавинного пробоя в зависимости от размера элементарной ячейки IGBT (моделирование)

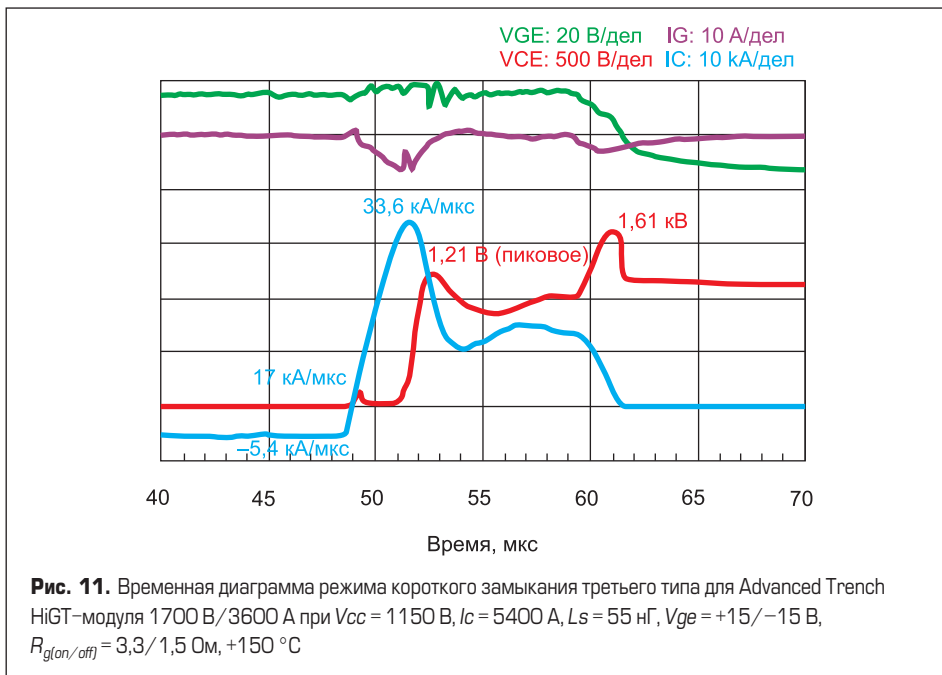


место короткое замыкание цепи между транзисторами верхнего и нижнего плеча полумоста. Экспериментально подтверждено, что Advanced Trench HiGT-модуль безопасно выключается после 10-мкс короткого замыкания третьего типа.

На рис. 12 продемонстрирован компромисс отношения между зарядом E_{off} и напряжением насыщения $V_{ce(sat)}$. Advanced Trench HiGT IGBT имеет такой же низкий уровень

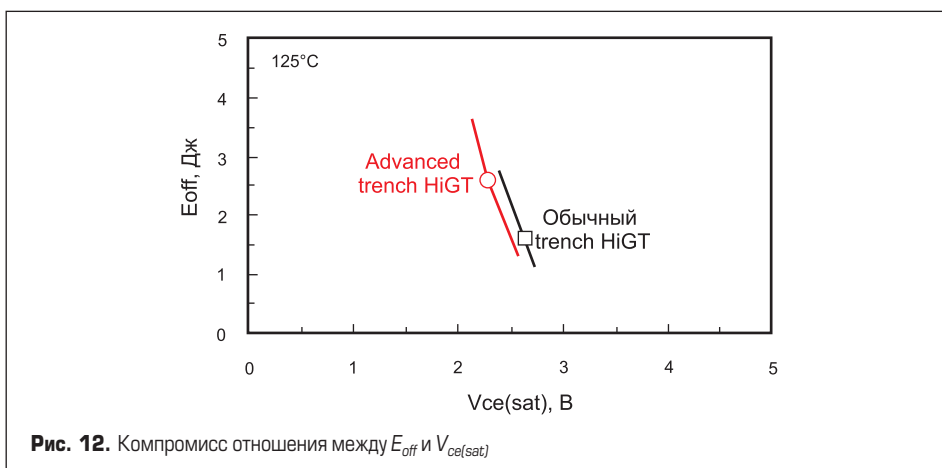
Потери

потерь, как и обычный Trench HiGT IGBT. Это происходит потому, что Advanced Trench HiGT IGBT имеет ту же структуру плавающего p -слоя, что и обычный прибор Trench HiGT, а плотность активных носителей n -диффузного слоя у него может быть выше, чем у обычных IGBT.



Закключение

Предложена структура чипа для технологии Advanced Trench HiGT с глубоким отдельным плавающим p -слоем и показаны характеристики нового 1700 В/3600 А Advanced Trench HiGT IGBT-модуля. Экспериментально подтверждено, что новый модуль имеет снижение нарастания скорости включения dV/dt на 25% при одновременном сохранении низкого уровня потерь, как и в обычном модуле. Кроме того, он характеризуется отсутствием «звона» напряжения на коллекторе на всем промежутке рабочих токов 0–3600 А в диапазоне температур $-40...+150$ °С. Подтверждено, что область безопасной работы SOA нового модуля является достаточно широкой, а его устойчивость к коротким замыканиям третьего типа достаточно высока. Таким образом, этот новый модуль, ввиду своих перечисленных свойств и особенностей, может легко управляться и использоваться в самых выгодных, с точки зрения потерь, режимах.



Литература

1. M. Mori et al. A Trench-Gate High-Conductivity IGBT (HiGT) With Short-Circuit Capability // IEEE Transact. on Elec. Dev. 2007. Vol. 54, № 8.
2. K. Oyama et al. Advanced HiGT with Low-injection Punch-through (LiPT) structure // Proc. ISPSD. 2004.
3. M. Yamaguchi et al. IEGT Design Criterion for Reducing EMI Noise // ISPSD. 2004.
4. Y. Onozawa et al. Development of the next generation 1200V trench-gate FS-IGBT featuring lower EMI noise and lower switching loss // Proc. ISPSD. 2007.