Быстрый IGBT с характеристиками переключения,

как у полевого МОП-транзистора

Благодаря малым статическим потерям IGBT, традиционно является прибором, который предпочитают использовать в системах с низкой частотой переключения, например, в инверторных электроприводах. В то же время с IGBT можно работать при высоких значениях плотности тока, и поэтому он обеспечивает экономичное решение в случае, если потребуется более высокая плотность мощности при более низкой стоимости. По этой причине также предполагается использовать его в системах с более высокой частотой коммутации, например в импульсных источниках питания, источниках бесперебойного питания (ИБП), в сварочных аппаратах, при индукционном нагреве и с недавнего времени — в инверторах солнечных батарей.

В этой статье мы представляем третье поколение быстрых IGBT на 600 В (семейство изделий H3) компании Infineon Technologies, оптимизированное для высокочастотных преобразователей с жесткой коммутацией. Рассмотрены основные характеристики прибора и преимущества его использования в предлагаемых областях применения.

Давид Шиола (Davide Chiola)

Хольгер Хускен (Holger Hüsken)

Томас Киммер (Thomas Kimmer)

Введение

Энергосберегающие государственные стандарты и снижение системных расходов — это главные движущие силы разработки более эффективных силовых ключей [1]. Разработчики вынуждены тщательно выбирать правильный ключ для соответствия обоим требованиям. В системах большой мощности (>5 кВт) обычно принято использовать IGBT или биполярные транзисторы. В маломощных (<2 кВт) системах на напряжения ниже 1000 В, с широким диапазоном входного напряжения и нагрузки, а также высокой частоте коммутации (>150 кГц), обычно предпочтение отдавалось полевым МОП-транзисторам. В импульсных источниках питания с жесткой коммутацией или коммутацией в нуле напряжения IGBT обычно применяется при более низкой частоте коммутации (<40 кГц) и там, где присутствует узкий диапазон изменения входного напряжения и нагрузки.

Типовыми областями применения для систем с жесткой коммутацией являются электроприводы, источники бесперебойного питания и сварочные аппараты. Хотя некоторые производители уже предлагают IGBT, разработанные для частот коммутации, даже превышающих 100 кГц, их применение несколько ограничено из-за трудности обеспечения высокого КПД в широком диапазоне нагрузок, как того требуют стандарты по энергосбережению. Использование частоты выше 40 кГц, тем не менее, наблюдается в резонансных схемах для индукционного нагрева и микроволновых печей благодаря применению мягкой коммутации в схемах ZVS и ZCS [3].

Современные поколения IGBT имеют две особенности, которые побуждают разработчиков расширять область применения, повышая рабочую частоту в схемах с жесткой коммутацией. Обычно размер чипа IGBT составляет 1/3 по сравнению с полевым МОП-транзистором с таким же номинальным током, что снижает емкость и заряд затвора для конструкции эквивалентной ячейки, а корреляция V_{cesat}–E_{off} может быть отрегулирована для требуемой частоты переключения путем настройки относительно малого набора технологических и проектных параметров.

Новые семейства быстрых IGBT позволяют разработчикам повысить частоту коммутации мощных транзисторов без изменения требований к их охлаждению. Тем самым можно снизить общую стоимость системы за счет снижения стоимости силовых ключей, а также размеров и стоимости пассивных компонентов.

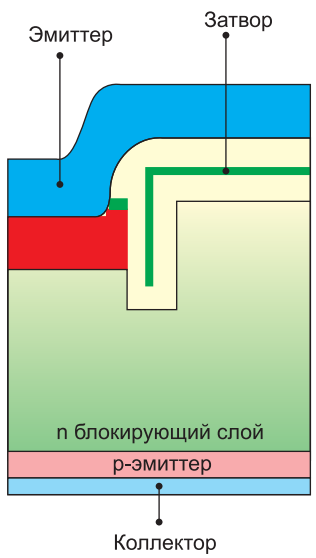

Рис. 1. TrenchStop IGBT

С такой мотивацией компания Infineon Technologies разработала третье поколение быстрых IGBT, оптимизированных для высокой частоты и режимов жесткой коммутации для таких областей применения, как сварочные аппараты, солнечная энергетика и источники бесперебойного питания (ИБП).

На частотах свыше 20 кГц потери на переключение обычно преобладают в общих потерях, и поэтому уменьшение E_{on} и E_{off} без существенного ущерба для V_{cesat} было одной из целей разработки. Другая цель — для снижения электромагнитных помех и уменьшения размеров фильтров избежать затухающих колебаний и сохранить гладкость формы тока и напряжения в момент комутации с типичным для IGBT компании Infineon низким dV/dt и dI/dt.

Для уменьшения потерь E_{off} при аппаратном переключении хвостовой ток при высокой температуре должен быть устранен, так как эти малые потери становятся особенно значимыми при высокой частоте переключения. Для снижения потерь E_{on} конструкция IGBT и обратный диод должны быть оптимизированы.

Таблица 1. Сравнение H3 со стандартным TrenchStop IGBT и прибором Coolmos C3

Прибор	Технология	Ic при 100 °C, A	Площадь кристалла, мм²
SPW47N60C3	Coolmos C3	30	69,3
IKW30T60	TrenchStop	30	15,2
IGW40N60H3	High Speed 3	40	19,3

Технология TrenchStop

Для достижения этой цели, как и в большинстве семейств IGBT, недавно выпущенных компанией Infineon Technologies, выбрана технология Trench Field Stop [4, 5]. В отличие от наших конкурентов, которые создают быстрые IGBT по планарной технологии, мы доказали, что оптимизированная структура Trench Stop (рис. 1) все еще обеспечивает наилучшее соотношение цена/качество для применения с высокой частотой коммутации.

Сочетание Trench-ячейки и структуры с блокирующим слоем позволяет подобрать концентрацию носителей внутри кристалла таким образом, что относительно более высокая плотность носителей вблизи канавочного затвора дает возможность уменьшить V_{cesat}, что подразумевает более высокую плотность тока и, следовательно, меньшую площадь кристалла и более низкую стоимость. С помощью современных технологий имплантации и отжига можно создать области с низким временем жизни носителей рядом с *p*-эмиттером на нижней стороне. В сочетании с пониженным легированием *p*-эмиттера на нижней стороне и оптимизированным блокирующим слоем это дает возможность производить быструю экстракцию носителей во время выключения и получить уменьшенные хвостовые токи при сохранении в целом мягкого режима выключения. Особое внимание с точки зрения технологии было уделено стабильности слабого эмиттера и, в результате, малому разбросу параметров ключей при отклонении параметров технологических процессов.

Динамические характеристики

Поведение полученного прибора в момент коммутации сравнивалось с приборами, выполненными по стандартной технологии IGBT3 с TrenchStop и Coolmos C3 с аналогичным номинальным током (табл. 1) в режиме жесткой коммутации в полумостовой схеме на индуктивной нагрузке. Для всех приборов обратным диодом являлся карбид-кремниевый диод Шоттки на 8 А от компании Infineon.

Coolmos C3 был выбран в качестве точки отсчета при тестировании ключевых характеристик. Результирующие осциллограммы процесса выключения показаны на рис. 2 и 3. Лабораторная установка для тестирования IGBT в полумостовой конфигурации не предназначалась для испытания Coolmos (вывод стока, как и другие паразитные индуктивности, должен быть уменьшен за счет специальных разъемов и оптимизированной разводки печатной платы). Поэтому для сравнения с Coolmos C3 сопротивление затвора R_g нужно было повысить (42 против 11 Ом) во избежание колебаний тока и напряжения.

Осциллограммы тока в IGBT H3 ясно показывают полное отсутствие хвостового тока при высокой температуре (рис. 2), а характеристики переключения при выключении напоминают однополюсный прибор быстрого выключения, подобный Coolmos C3 (рис. 3). Энергия выключения снижена на 60% по сравнению со стандартным TrenchStop IGBT3 при росте V_{cesat} только на 25%.

В рамках таких испытаний IGBT H3 с номинальным током 40 А на самом деле демонстрирует более высокую скорость спада тока (dI/dt) при выключении, чем Coolmos C3 с 30 А (2080 против 1000 А/мкс на приведенном графике), все еще обеспечивая мягкий характер коммутации и умеренный выброс напряжения в 100 В. В связи с более крутым ростом напряжения Coolmos C3 характеризуется на 17% более низким значением E_{off}.

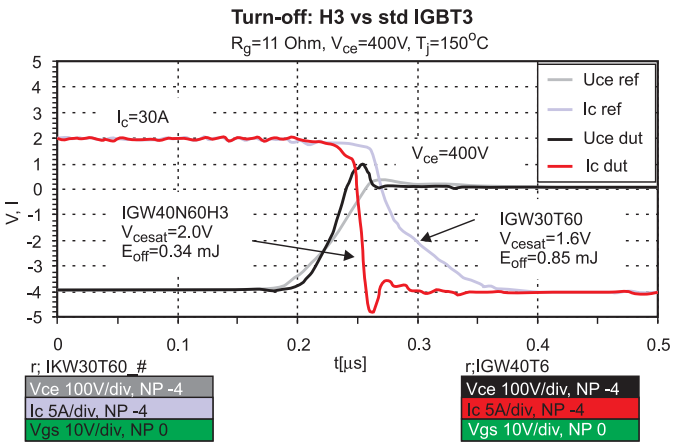

Рис. 2. Осциллограммы выключения H3 и стандартного IGBT с TrenchStop

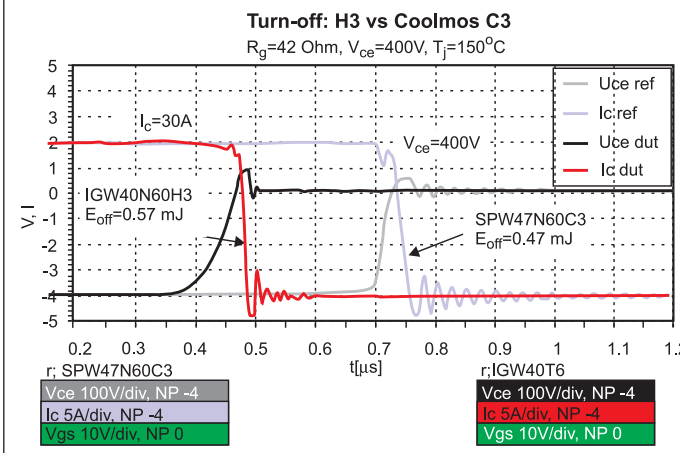

Рис. 3. Осциллограммы выключения IGBT H3 и Coolmos C3

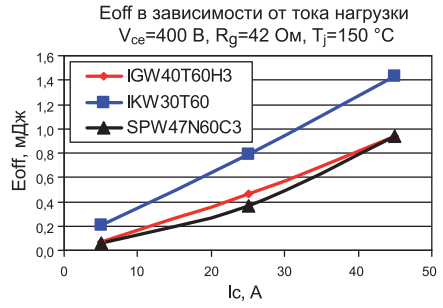

Рис. 4. Зависимость E_{off} от тока нагрузки

Полное сравнение при разных значениях тока нагрузки показано на рис. 4.

Тестирование приборов-«конкурентов» выполнялось на базе той же испытательной схемы и график результирующего соотношения V_{cesat}/E_{off} показан на рис. 5.

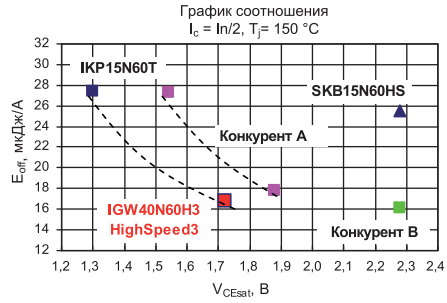

Рис. 5. Оценка приборов–«конкурентов»

IGBT H3 обладает на 170 мВ ниже V_{cesat} и на 6% ниже E_{off}, чем лучший из конкурентов. На графике ясно видно превосходство избранного проектного сочетания Trench-затвора и блокирующего слоя. Приборы IKP15N60T и IGW40N60H3 выполнены на базе одинаковой технологии TrenchStop и лежат на лучшей технологической кривой (пунктиром), обладая существенно сниженными значениями V_{cesat} и немного сниженными значениями E_{off} по сравнению с Конкурентом A, выполненным по схеме планарный затвор + блокирующий слой. Прибор SKB15N60HS от Infineon и Конкурент B также являются высокоскоростными приборами, однако выполнены по технологии NPT (Non Punch Through), недостатком которой является существенно более высокое напряжение V_{cesat}.

Выбор диода

Для схем, в которых требуется наличие обратно-параллельного диода, высокоскоростной IGBT 3 включается в паре с 600-вольтовым диодом 3-го поколения, выполненным по технологии Emitter Controlled diode. При выборе размера кристалла мы приняли во внимание то, что в большинстве целевых областей применения, например в инверторах ИБП и солнечных батарях, поток энергии однонаправленный (например, от солнечной батареи в сеть переменного тока для солнечных инверторов). Это приводит к понижению загрузки диода по сравнению с загрузкой диодов в инверторах электроприводов с полумостовой конфигурацией, где в режиме торможения (cosφ< 0) наблюдается значительный рост температуры кристаллов диодов за счет потерь на прямую проводимость в диоде.

Другим важным отличием от систем электропривода является форма импульса тока, проходящего через IGBT: в типичных одно- и двухтранзисторных топологиях, например импульсных источниках питания, корректорах коэффициента мощности и сварочных аппаратах, обычно наблюдается треугольная или трапецеидальная форма тока. Из этого следует, что IGBT жестко включается с токами меньшими, чем токи выключения, и в результате обратный диод может быть рассчитан на меньшие номинальные значения токов, таким образом внося свой вклад в общее снижение коммутационных потерь.

Влияние различных диодов на поведение 30-амперного IGBT H3 при включении показано на рис. 6.

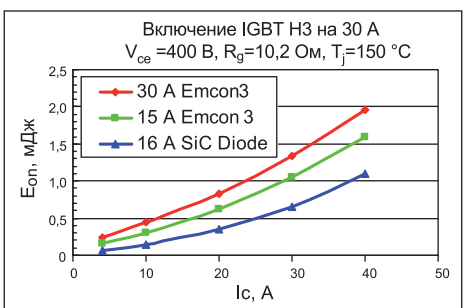

Рис. 6. Выбор диода для IGBT H3 на 30 A

Для того чтобы обеспечить реальные рабочие условия, мы установили ток нагрузки, равный половине номинального тока, так как при высокой частоте переключения может потребоваться некоторое снижение номинального тока. Из-за разного размера кристалла испытываемого прибора значения потерь E_{off} были откалиброваны к общему номиналу тока. Хотя карбид-кремниевый диод обеспечивает 50% снижения потерь IGBT при включении, был выбран «15-амперный» Emcon3, который, с одной стороны, обеспечивает достаточно быстрое включение и, с другой стороны, позволяет сохранить более низкую стоимость изделия. Высокая устойчивость и большие возможности управления энергией диодов серии Emitter Controlled 3-го поколения позволяют повысить плотность коммутируемого тока. Присущая диоду мягкая коммутация дает возможность снизить R_{gon}, благодаря чему потери включения IGBT уменьшаются, а электромагнитные помехи остаются на низком уровне.

Распределение потерь

Распределение потерь мощности в транзисторе в реальной схеме было смоделировано для прибора с номинальным током 40 A при следующих условиях (рис. 7): I_c = 40 A, V_{dc} = 400 В, $R_{g,on}$ = 6,9 Ом, $R_{g,off}$ = 3,2 Ом, коэффициент заполнения — 0,5, T_j = 150 °C, f_{sw} = 20 и 40 кГц, прямоугольный импульс с жесткой коммутацией (включение и выключение на полный ток). IGBT H3 обеспечивает на 10% и на 4% меньше потерь при частоте 20 и 40 кГц соответственно, по сравнению с лучшим конкурентом, благодаря снижению потерь E_{off}. При частоте 20 кГц статические потери все еще вносят около 50% вклада в общие потери, поэтому и стандартный прибор IKW40N60T по TrenchStop-технологии демонстрирует аналогичные потери в связи с более низким напряжением V_{cesat}.

Анализ ясно показывает, что для быстрых IGBT в коммутационных потерях на переключение преобладают потери E_{on}. Это указывает на направление дальнейшего совершенствования данных приборов.

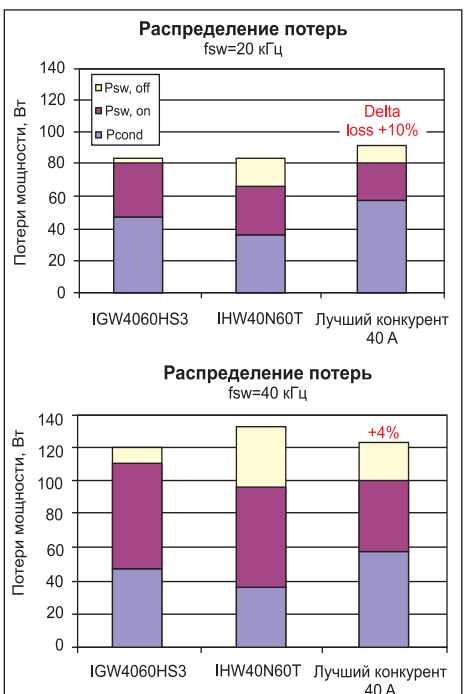

Рис. 7. Оценка распределения потерь для одного прибора в реальных условиях

Внутрисхемное испытание

Для того чтобы оценить работу быстрого IGBT3 в условиях быстрой коммутации, 20-A и 30-A приборы были испытаны в составе испытательной платы корректора коэффициента мощности, обычно используемой для замеров производительности приборов Coolmos в компании Infineon Technologies (рис. 8).

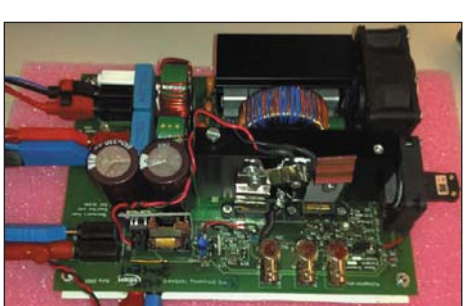

Рис. 8. Испытательная плата ККМ

Таблица 2. Приборы, выбранные для испытания в схеме ККМ

Прибор	Описание	Площадь кристалла, мм²
IGP20N60H3	IGBT H3 20 A – TO220	10,2
IGP30N60H3	IGBT H3 30 A – TO220	13,2
SPW47N60C3	Coolmos C3, 70 мОм – TO247	69,3
SPP24N60C3	Coolmos C3, 160 мОм – TO220	30,2
Конкурент X	Станд. МОП: 130 мОм – PlusTO247	151,9
Конкурент Y	Станд. МОП: 150 мОм – TO264	72,8

Характеристики платы: максимальная нагрузка 1 кВт, выходное постоянное напряжение 400 В, диапазон входного переменного напряжения 115–230 В, ККМ работает в режиме непрерывного тока.

Контроллер позволяет изменять рабочую частоту от 60 до 300 кГц. Температура на корпусе испытуемого прибора поддерживается равной 40 °С с помощью сочетания нагревателя и управления вентилятором. Индуктивность дросселя корректора коэффициента мощности равна 1 мкГн, а бустерным диодом для всех групп являлся 6-амперный карбид-кремниевый диод Шоттки IDT06S60C. Источник переменного тока — Chroma 6530, а нагрузка постоянного тока — Chroma 63202. КПД измерялся с помощью анализатора мощности Siemens B6040.

IGBT H3 сравнивался с прибором Coolmos C3 и другим обычным (не имеющим суперперехода) полевым МОП-транзистором компании-конкурента (табл. 2).

В связи с относительно большим размером кристаллов этих приборов выполнялись только испытания при низком входном напряжении (115 В). Даже в этом случае при максимальной выходной мощности 1 кВт выходной ток составляет около 10 А, что составляет 1/2–1/3 от номинального тока выбранных приборов. Результаты приведены на рис. 9 и 10.

При работе на частоте 100 кГц выходная мощность была ограничена 600 Вт для ограничения температуры прибора. Прибор Coolmos C3 на 70 мОм, лучший в классе корпусов TO247, показывает самый высокий КПД при токе нагрузки более 600 Вт. IGBT H3 в корпусе TO220 явно превосходит обычные полевые МОП-транзисторы в больших по размеру корпусах при работе как на частоте 60, так и 100 кГц, используя от 1/7 до 1/10 площади кристалла. Несмотря на в два раза меньшую площадь кристалла, IGBT H3 превосходит по производительности Coolmos C3 на 160 мОм при работе на мощностях выше 850 Вт, ясно показывая преимущество этой технологии быстрого IGBT с точки зрения плотности мощности и выявляя экономичное решение для ККМ на мощности более 1 кВт (например, в импульсных источниках питания телекоммуникационного назначения). Благодаря более низким значениям V_{cesat} и R_{thjc}, при работе на частоте 60 кГц IGBT H3 на 30 А обеспечивает некоторое преимущество над 20-амперным на большей нагрузке.

Осциллограммы переключения, зафиксированные во время испытания при работе на частоте 60 кГц, показаны на рис. 11.

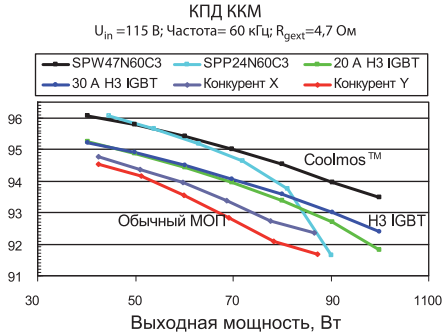

Рис. 9. Измерение КПД ККМ при 60 кГц

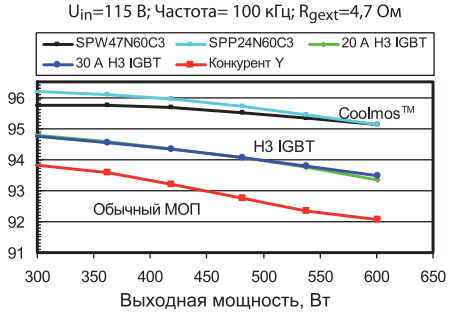

Рис. 10. Измерение КПД ККМ при 100 кГц

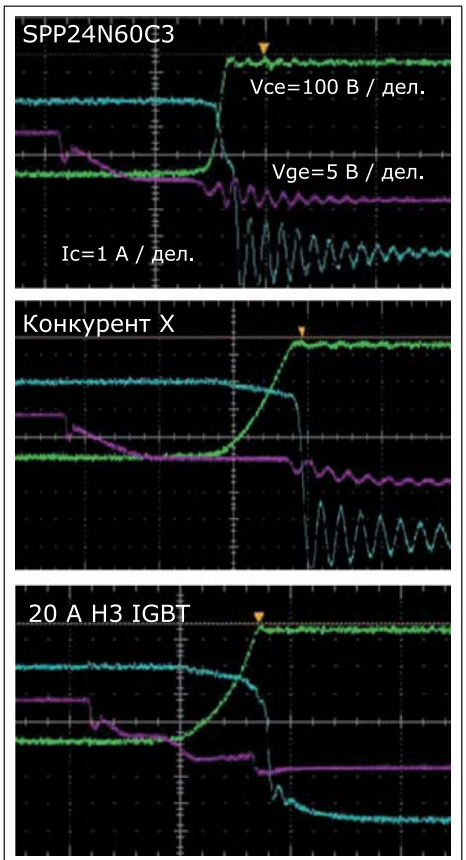

Рис. 11. Осциллограммы выключения

При внешнем сопротивлении затвора, равном 4,7 Ом, IGBT H3 демонстрирует мягкую коммутацию тока в отсутствие затухающих или простых колебаний, а также в отсутствие выброса напряжения, что позволяет говорить о понижении уровня электромагнитных помех. Несмотря на больший размер кристалла, требуется малое значение R_g для минимизации времени переключения, Coolmos и обычный МОП показывают быстрое выключение при достаточно большом сопротивлении затвора. Благодаря мягким коммутационным характеристикам быстрого IGBT 3 появилась возможность уменьшения резистора затвора, что в свою очередь выражается в снижении потерь и приводит к уменьшению стоимости системы за счет упрощения охлаждения и фильтрации.

Заключение

Представлен новый высокоскоростной IGBT 3 на 600 В компании Infineon Technologies, получивший обозначение H3. Новый прибор обеспечивает эталонную производительность и является экономичным решением для применения в солнечной энергетике, ИБП, сварочных аппаратах и импульсных источниках питания. Динамические характеристики показывают полное отсутствие хвостового тока даже при повышенных температурах, что делает выключение похожим на поведение прибора Coolmos. Тип и номинал обратнопараллельного диода выбирались на основе требований целевых областей применения. Наконец, внутрисхемная оценка, выполненная на испытательной плате ККМ, показала более высокую производительность по сравнению с обычными полевыми МОП-транзисторами с гораздо большими размерами кристалла при работе в широком диапазоне нагрузок. Плавное переключение при отсутствии колебаний тока и выбросов напряжения даже при низком сопротивлении затвора делают IGBT H3 оптимальным решением для улучшения производительности систем и снижения их стоимости.

Литература

1. Примеры энергосберегающих стандартов:
   - Energy Star (http://www.energystar.gov)
   - 80plus (http://www.80plus.org)
   - CECP (China Energy Conservation Project http://www.cecp.org.cn)
2. Kimmer T., Oehmen J., Tuerkes P., Voss S. Reverse Conducting IGBT. A new Technology to Increase the Energy Efficiency of Induction Cookers // Power Electronics Specialists Conference, PESC. 2008.
3. Laska T., Munzer M., Pfirsch F., et al. The Field Stop IGBT: a new Power Device Concept with a Great Improvement Potential // Proceedings ISPSD, 2000.
4. Ruthing H., Umbach F., Hellmund O., et al. 600V-IGBT3: Trench Field Stop Technology in 70 µm Ultra Thin Wafer Technology // Proceedings ISPSD, 2003.