

Быстродействующие 650-В IGBT-транзисторы

для DC/DC-преобразователей на частотах до 200 кГц

Растущие требования к увеличению мощности высоковольтных источников питания и снижению их стоимости заставляют производителей полупроводниковых приборов создавать IGBT-транзисторы, способные действовать на рабочих частотах свыше 100 кГц. Компанией IR была создана технология Punch-Through (PT) с запирающим напряжением 650 В, оптимизированная для работы в DC/DC-преобразователях на частотах до 200 кГц. Высокое значение температуры перехода T_{jmax} , равное +175 °С, также способствует уменьшению габаритных размеров данных устройств. В статье описываются особенности сверхбыстродействующего IGBT и проводится его сравнение с эквивалентными приборами, имеющимися сегодня на рынке.

Сюэ-Ронг Чанг
(Hsueh-Rong Chang)

Джианканг Бу
(Jiankang Bu)

Джордж Конг
(George Kong)

Рачана Боу
(Rachana Bou)

hrchang1@irf.com

Перевод:
Алексей Павленко

Alexey.Pavlenko@symmetron.ru

Введение

Биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) применяются в качестве силовых ключей уже более 30 лет. Транзисторы используют, главным образом, в инверторах и устройствах управления электродвигателями, для которых требуются относительно низкочастотные ключи с высокой плотностью тока. В силовых преобразователях наблюдается тенденция к постоянному увеличению частоты переключения, поэтому в случае импульсных источников питания IGBT находят довольно ограниченное применение. Обычно в качестве ключей в высоковольтных импульсных источниках питания предусмотрены силовые MOSFET.

По сравнению с традиционным силовым MOSFET, при применении в высокочастотных и высоковольтных устройствах MOSFET с суперпереходом (SJ MOSFET) имеют меньшие потери на проводимость при том же напряжении пробоя. Однако платить за это приходится усложнением процесса их изготовления с помощью дополнительных масок [1–4]. Создание IGBT с характеристиками, которые позволяли бы применять их в схемах с жесткой коммутацией на частотах свыше 100 кГц, осложняется наличием в таких транзисторах неосновных носителей заряда. В данной статье мы впервые сообщаем о том, что в сверхбыстродействующих IGBT-транзисторах, изготовленных по технологии ультратонких полупроводниковых пластин (ultra-thin wafer technology), удалось снизить потери мощности до уровня потерь в SJ MOSFET, при этом производство новых IGBT гораздо проще, чем SJ MOSFET. Кроме того, они допускают бо-

лее высокую максимальную температуру перехода T_{jmax} , равную +175 °С, по сравнению с +150 °С у SJ MOSFET. Характеристики и себестоимость новых IGBT обеспечивают перспективность их использования в DC/DC-преобразователях, работающих на частотах до 200 кГц.

Структура прибора и его изготовление

Высокочастотные 650-В IGBT изготавливаются на тонких 70-мкм пластинах с использованием структуры Punch-Through (PT), как показано на рис. 1. Технология применения ультратонких пластин позволяет формировать слаболегированный коллектор, что снижает накапливаемый заряд, приводя в результате к лучшим характеристикам переключения, особенно при высоких температурах.

В традиционных Punch-Through IGBT для увеличения скорости переключения предусмотрены различные технологические приемы, позволяющие уменьшить время жизни неосновных носителей заряда — например, облучение электронами или легирование металлом. Одним из побочных эффектов указанных процессов является быстрый рост тока утечки с увеличением температуры, что ограничивает значение T_{jmax} на уровне +150 °С.

При изготовлении быстродействующих IGBT с использованием технологии тонких пластин уменьшение времени жизни неосновных носителей заряда не применяется. Ток утечки при температуре +175 °С удерживается на низком уровне, что позволяет работать при T_{jmax} равной +175 °С. Таким образом, токонесящая способность при применении данной технологии увеличивается, а это в дальнейшем при-

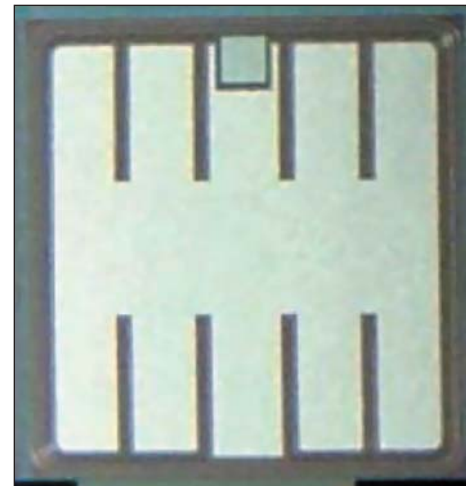
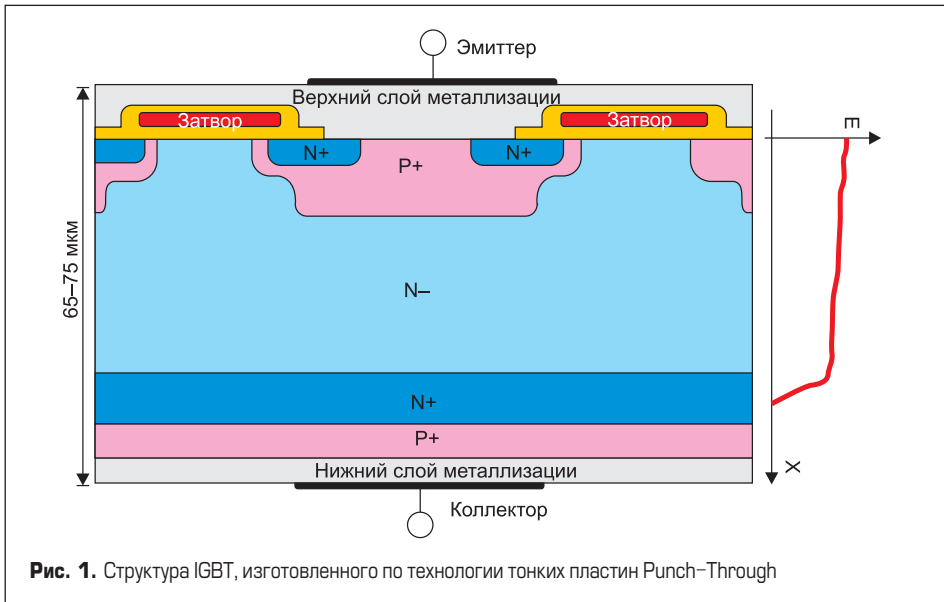


Рис. 2. Фотография IGBT, изготовленного по технологии тонких пластин Punch-Through

водит к уменьшению габаритных размеров преобразователей.

При разработке сверхбыстродействующего IGBT для 200-кГц DC/DC-преобразователя выяснилось, что он будет значительно отличаться от стандартного IGBT для управления электроприводом. Транзисторам, применяемым в импульсных источниках питания, не требуется большая область безопасной работы (Safe Operating Area — SOA) при коротком замыкании. Для снижения падения напряжения в открытом состоянии предпочтительны IGBT с более высокой плотностью ячеек, в то же время для достижения высоких скоростей переключения нужна более низкая емкость затвора (Q_g) и минимальное внутреннее сопротивление затвора (R_g). Пороговое напряжение выбрано в стандартном диапазоне 3–5 В. На рис. 2 показана фотография быстродействующего IGBT-транзистора.

Результаты и обсуждение

Сравнение MOSFET- и IGBT-транзисторов иногда может вызывать затруднения, так как параметры этих приборов задаются в спецификациях по-разному. Для MOSFET-транзисторов характерно чисто резистивное поведение, поэтому у них падение напряжения в открытом состоянии линейно возрастает с увеличением тока. По сравнению с линейной характеристикой MOSFET в открытом состоянии, IGBT имеет дополнительное пороговое напряжение на *p-n*-переходе коллектора, при этом напряжение насыщения (V_{CEsat}) с ростом тока меняется нелинейно.

На рис. 3 сравниваются зависимости тока от напряжения для быстродействующего IGBT и одного из серийно выпускаемых SJ MOSFET. Площади кристаллов обоих приборов почти идентичны. У SJ MOSFET сопротивление $R_{DS(On)}$ при комнатной температуре мало, и оно быстро увеличивается по мере роста температуры — на 260% при изменении температуры от +25 до +150 °С. При тех же условиях сопротивление быстродействию-

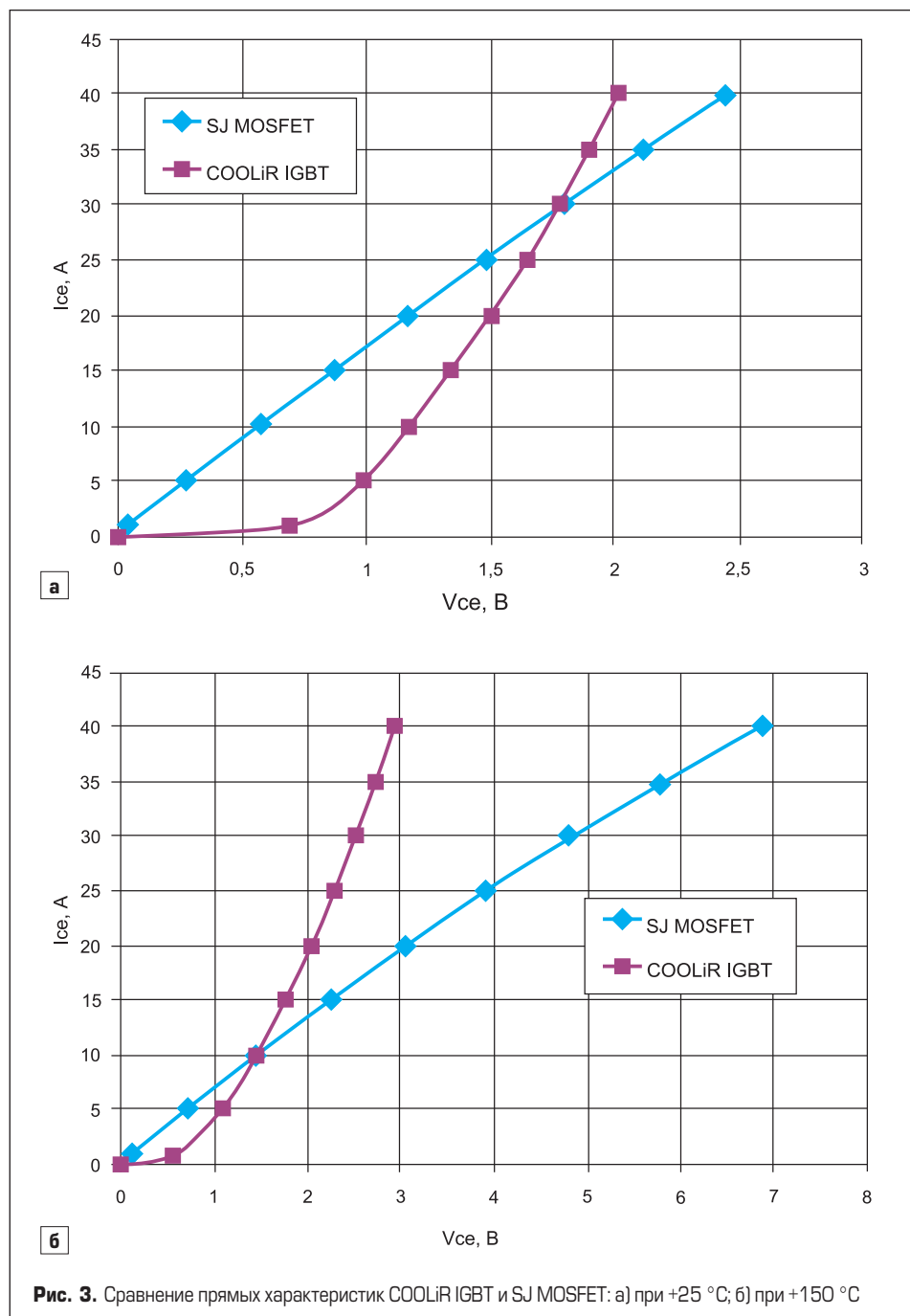


Рис. 3. Сравнение прямых характеристик COOLiR IGBT и SJ MOSFET: а) при +25 °С; б) при +150 °С

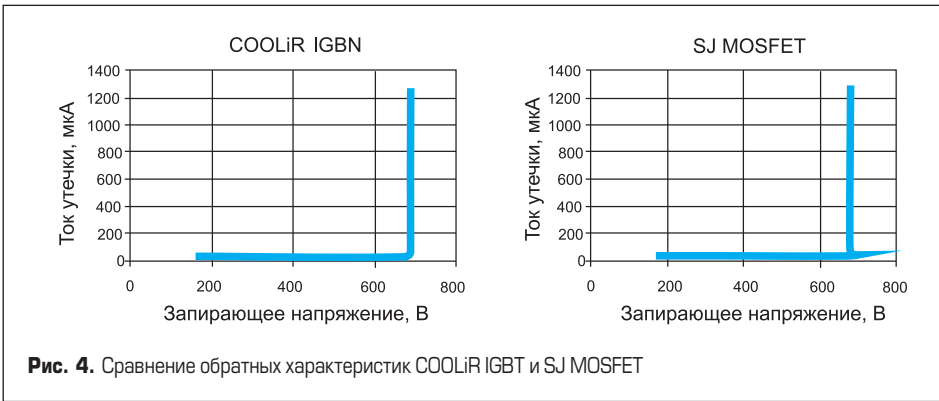


Рис. 4. Сравнение обратных характеристик COOLiR IGBT и SJ MOSFET

ющего IGBT-транзистора, изготовленного по технологии тонких пластин, возрастает всего на 37%. На рис. 4 приведены обратные характеристики быстродействующего IGBT и SJ MOSFET. Запирающее напряжение (blocking voltage) обоих приборов примерно одинаково и составляет 690 В.

С помощью приведенной на рис. 5 испытательной схемы были измерены потери мощности при включении и выключении транзисторов. Энергия включения испытываемых приборов (Device Under Test — DUT) в большой степени зависит от характеристик быстродействующего обратного диода [5]. Поэтому, чтобы гарантировать адекватность сравнения процессов отпирания IGBT и MOSFET, в испытательной схеме был использован внешний диод.

Осциллограммы процессов переключения IGBT и SJ MOSFET при температуре +150 °С показаны на рис. 6 и 7 соответственно. Энергия включения быстродей-

ствующего IGBT-транзистора при 10 А составляет 156 мкДж, тогда как у SJ MOSFET она достигает 135 мкДж, что обусловлено, главным образом, временем восстановления внешнего диода. Энергия выключения контролируется самим испытываемым прибором. Для быстродействующего IGBT-транзистора она довольно мала — 87 мкДж, а для SJ MOSFET — 70 мкДж.

В устройствах с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), работающих в режиме жесткой коммутации, суммарные потери мощности в каждом силовом транзисторе складываются из потерь на проводимость, потерь при включении (turn-on loss) и потерь при выключении (turn-off loss). Были рассчитаны суммарные потери мощности для быстродействующего IGBT и SJ MOSFET при их использовании в DC/DC-преобразователе, действующем на частоте 200 кГц при коэффициенте заполнения 50%. Результаты приведены в таблице 1. При малом токе (10 А)

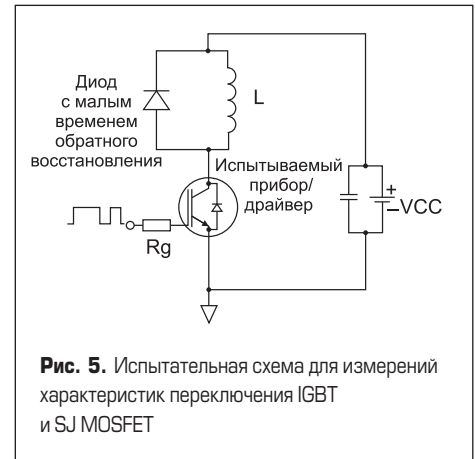


Рис. 5. Испытательная схема для измерений характеристик переключения IGBT и SJ MOSFET

прямое падение напряжения на открытых быстродействующем IGBT и SJ MOSFET примерно одинаково. Потери на переключение IGBT на 14% выше, чем у SJ MOSFET. Таким образом, суммарные потери у быстродействующего IGBT на 11% больше, чем у SJ MOSFET.

При увеличении тока до 15 А напряжение на открытом быстродействующем IGBT становится намного ниже, чем на SJ MOSFET (согласно рис. 36 — 1,77 и 2,23 В соответственно). Потери на проводимость в IGBT становятся значительно меньше (на 26%), чем в SJ MOSFET, хотя потери на переключение в IGBT оказываются выше на 8%. В результате при токе 15 А суммарные потери мощности в быстродействующем IGBT и в SJ MOSFET приблизительно равны (табл. 2).

При работе в режиме мягкой коммутации, например в устройствах с переключениями

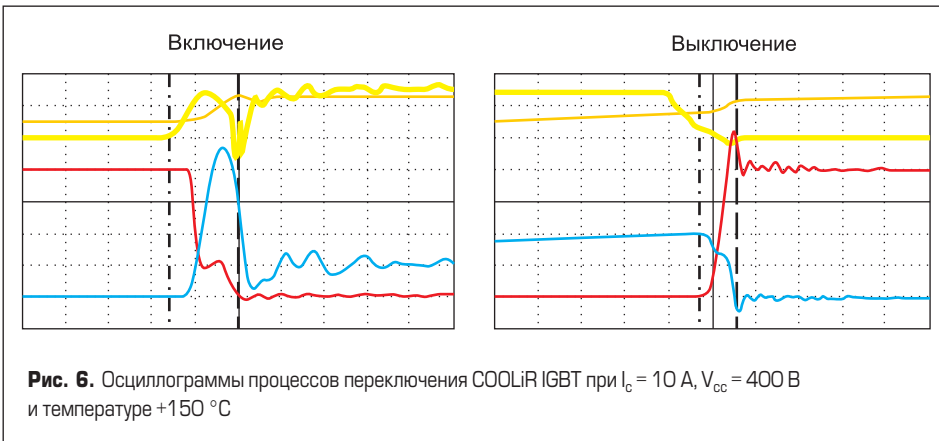


Рис. 6. Осциллограммы процессов переключения COOLiR IGBT при $I_c = 10$ А, $V_{cc} = 400$ В и температуре +150 °С

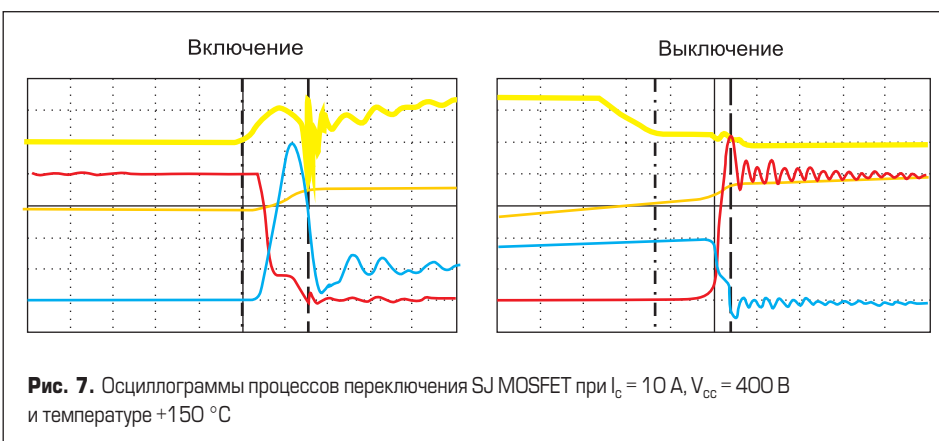


Рис. 7. Осциллограммы процессов переключения SJ MOSFET при $I_c = 10$ А, $V_{cc} = 400$ В и температуре +150 °С

Таблица 1. Потери мощности при $I_c = 10$ А и температуре +150 °С

Параметр	COOLiR IGBT	SJ MOSFET
E_{on} , мкДж	156	143
E_{off} , мкДж	87	70
Потери на переключение, Вт	24,3	21,3
Потери на проводимость, Вт	7,25	7,25
Суммарные потери, Вт	31,55	28,55

Таблица 2. Потери мощности при $I_c = 15$ А и температуре +150 °С

Параметр	COOLiR IGBT	SJ MOSFET
E_{on} , мкДж	214	195
E_{off} , мкДж	143	139
Потери на переключение, Вт	35,7	33
Потери на проводимость, Вт	13,28	16,73
Суммарные потери, Вт	48,98	49,73

Таблица 3. Потери мощности при $I_c = 15$ А и температуре +150 °С (в схемах с ZVS)

Параметр	COOLiR IGBT	SJ MOSFET
E_{off} , мкДж	143	139
Потери на переключение, Вт	28,6	27,8
Потери на проводимость, Вт	13,28	16,73
Суммарные потери, Вт	41,86	44,53

при нулевом напряжении (Zero-Voltage-Switching — ZVS), энергия включения пренебрежимо мала, поскольку транзисторы переходят в открытое состояние в те моменты, когда напряжение на компоненте становится равным нулю. В этом случае потери на проводимость и потери при выключении являются основными слагаемыми суммарных потерь для обоих транзисторов. В таблице 3 сравниваются потери мощности для быстродействующего IGBT и SJ MOSFET при их использовании в ZVS-схеме. Общие потери в быстродействующем IGBT на 6% ниже, чем в SJ MOSFET.

В преобразователях с большей выходной мощностью у COOLiR IGBT потери на проводимость будут гораздо ниже, чем у SJ MOSFET, а потери при выключении у транзисторов обоих типов — примерно одинаковы. Таким образом, чтобы добиться более высокой эффективности DC/DC-преобразователей, следует использовать транзисторы COOLiR IGBT.

В случае ZVS-преобразователей с напряжением на шине питания 400 В и коэффициентом заполнения 50% потери при включении пренебрежимо малы. Для различных частот переключения был рас-

считан максимально допустимый ток для COOLiR IGBT и SJ MOSFET и использовано значение T_{jmax} , равное +150 °С. Результаты показаны на рис. 8. Максимальный входной ток у COOLiR IGBT и SJ MOSFET примерно одинаков и составляет около 14 А при 200 кГц.

Для COOLiR IGBT максимально допустимая температура T_{jmax} составляет +175 °С, тогда как у SJ MOSFET T_{jmax} ограничена величиной +150 °С. При +175 °С у COOLiR IGBT падение напряжения в открытом состоянии возрастает на 8%, а энергия выключения увеличивается на 1,4%. На рис. 9 сравниваются зависимости максимального входного тока от частоты переключения для COOLiR IGBT при T_{jmax} , равной +175 °С, и для SJ MOSFET при T_{jmax} , равной +150 °С. Максимальный ток транзистора COOLiR IGBT увеличился до 21 А, что на 50% больше, чем у SJ MOSFET.

Вдобавок транзисторы COOLiR IGBT чрезвычайно надежны, поскольку характеризуются большой областью безопасной работы (SOA), абсолютно квадратной областью безопасной работы при обратном смещении RBSOA (Reverse Bias Safe Operating Area) при $V_{cc} = 480$ В и $I_c = 120$ А, а также защитой от короткого замыкания длительностью 10 мкс при $V_{cc} = 400$ В и температуре +150 °С.

Простой процесс изготовления, высокая нагрузочная способность по току и большая область безопасной работы позволяют использовать COOLiR IGBT в качестве недорогих и высокоэффективных ключей в высокочастотных DC/DC-преобразователях.

Закключение

Для DC/DC-преобразователей, функционирующих на частотах до 200 кГц, был успешно разработан быстродействующий РТ (Punch-Through) IGBT на ультратонкой пластине. Простой процесс изготовления, высокая нагрузочная способность по току и большая область безопасной работы делают COOLiR IGBT конкурентоспособным по стоимости и эффективности, что позволяет использовать его в качестве альтернативы обычно применяемым в высокочастотных DC/DC-преобразователях транзисторам.

Авторы благодарят Хеннинга Хауенштейна (Henning Hauenstein), а также руководство и инженерный персонал производственного центра Тетесила за их поддержку.

Литература

1. Hancock J. Superjunction FETS Boost Efficiency in PWM. Power Electronics Technology. 2005
2. Saito W. et. al. Proceeding ISPSD. 2006.
3. Takabashi K. et. al. Proceeding ISPSD. 2008.
4. Sakakibara J. et. al. Proceeding ISPSD. 2006.
5. Baliga B. J. Powe Semiconductor Devices. PWS. 1995.

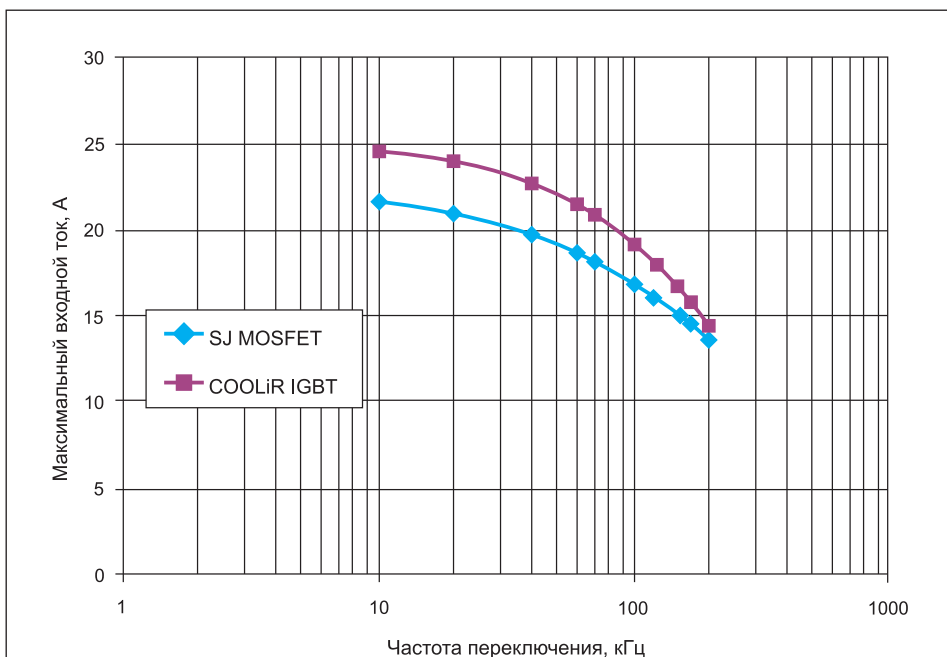


Рис. 8. Сравнение максимального входного тока в ZVS-преобразователях при различных частотах переключения для COOLiR IGBT и SJ MOSFET при +150 °С

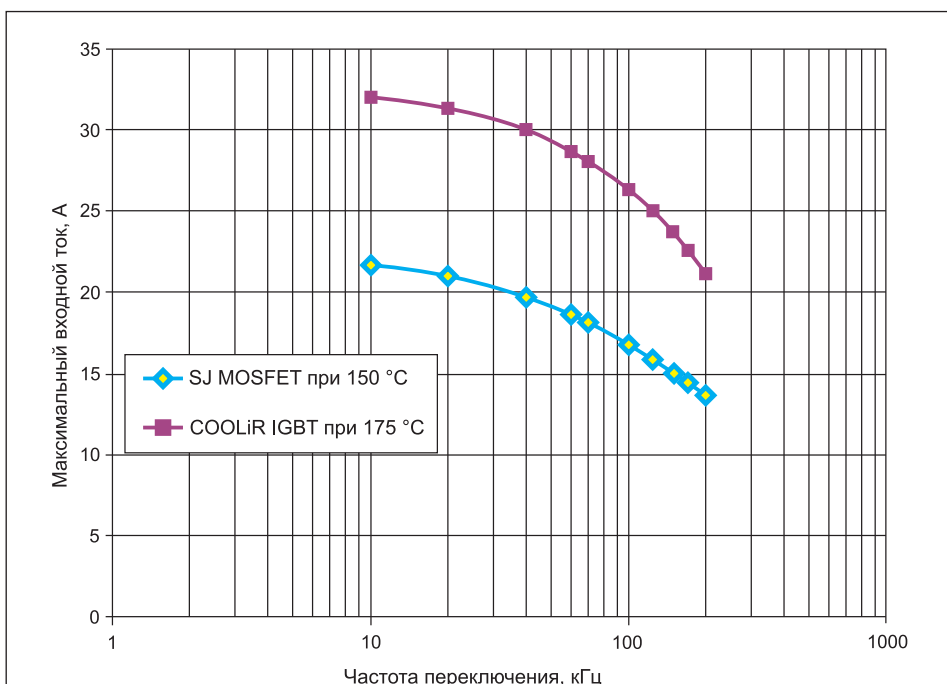


Рис. 9. Максимальный входной ток на частоте 200 кГц для COOLiR IGBT при $T_{jmax} = +175$ °С на 50% больше тока для SJ MOSFET (14 А) при $T_{jmax} = +150$ °С