

IGBT МОДУЛИ HiPak НА ТОК ДО 3,6 кА ПО ТЕХНОЛОГИИ SPT+



М.Рахимо, Д.Шнайдер,
Р.Шнелл, С.Айхер, У.Шлапбах

С 2006 года швейцарской компанией ABB Switzerland Ltd. Semiconductors (ABB) успешно освоен выпуск IGBT-модулей на напряжение от 1200 до 4500 В, выполненных на базе новой технологической платформы SPT+. По этой технологии также начато производство IGBT-модулей серии HiPak1 с размером корпуса 140x130 мм. Модули с чипами SPT+ не уступают по своим коммутационным характеристикам и области безопасной работы (ОБР) современному поколению приборов на основе SPT технологии, но отличаются более низкими общими потерями и повышенной токовой нагрузкой. Статья разработчиков этих модулей, несомненно, представляет интерес для читателей журнала.

ВВЕДЕНИЕ

Потребители изделий силовой электроники продолжают повышать требования к параметрам потерь, надежности и управляемости характеристик силовых приборов. Основные достоинства используемой в настоящее время для создания IGBT технологии SPT (Soft Punch Through) – обеспечение высокой надежности и мягких характеристик переключения [1]. Недавно освоенная усовершенствованная планарная технология SPT+ успешно объединила технические решения задач снижения потерь и существенного расширения ОБР [2]. Результаты, представленные в статье, показывают, что, кроме низких потерь в проводящем состоянии и коммутационных потерь, IGBT, выполненные по SPT+ технологии, характеризуются высокими уровнями стойкости к токам короткого замыкания и надежности при выключении. По уровню потерь SPT+ приборы сопоставимы с IGBT, изготовленными по траншейной технологии. В дополнение к этому, благодаря использованию хорошо зарекомендовавшей себя буферной структуры, обеспечивающей "мягкое перекрытие поля", достигаются отличная управляемость коммутационными характеристиками и мягкие характеристики выключения, которые очень важны для модулей с высокой токовой нагрузкой.

ТИПОВОЙ РЯД HiPak-МОДУЛЕЙ

Снижение общих потерь SPT+ IGBT чипов позволяет повысить токовые номиналы HiPak модулей и установить новые стандарты их эффективности и выносливости. Внедрение типового ряда IGBT, выполненных по технологии SPT+, совпадает с началом

производства серии HiPak1 модулей в стандартном корпусе размером 140x130 мм. Помимо варианта корпуса размером 190x140 мм (HiPak2) с одиночным ключом и прерывателем (chopper), серия HiPak1 также представлена сдвоенными IGBT и диодами в корпусах со стандартным и высоким ($V_{\text{изол}} = 10,2 \text{ кВ}$) уровнями напряжения изоляции.

ПЛАНАРНАЯ SPT+ ТЕХНОЛОГИЯ

Платформа следующего поколения SPT технологии была разработана с целью снижения прямого падения напряжения при сохранении низкого уровня коммутационных потерь. Такой подход потребовал тщательного компромисса между такими параметрами, как высокая стойкость к воздействию космического излучения и предсказуемая коммутация, а также сохранения высокой выносливости при выключениях, уже достигнутой SPT технологией.

Новая технологическая платформа SPT+ реализует расширенный профиль распределения носителей заряда, благодаря чему удалось сформировать исключительно надежную и выносливую конструкцию ячеек (рис.1). Эта технология позволяет существенно повысить концентрацию носителей заряда вблизи эмиттера и тем самым обеспечить более низкое, чем у SPT приборов, падение напряжения в открытом состоянии при тех же потерях на переключение. Кроме этого, объединение оптимизированной области базы с SPT буферным слоем обеспечивает, благодаря управляемому формированию обедненного слоя, плавное уменьшение тока коллектора во время переходного процесса при выключении. SPT буферный слой и оптимальная конструкция ячейки гарантируют хорошую управляемость и широкую область безопасной работы SPT+ чипа при коротком замыкании (ОКЗ).

Благодаря комбинации расширенной конструкции ячеек и концепции SPT, технологическая платформа SPT+ дала возможность ABB создать новый эталон технологической линии для всех классов напряжения. На рис.2 представлено сравнение значений падения напряжения модулей на напряжение от 1200 до 4500 В, выполненных по SPT и SPT+ технологиям. Результаты сравнения показывают, что по конфигурации профиля распределения носителей заряда оптимизированная планарная

SPT+ структура соответствует траншейной структуре. Значения $V_{ce,sat}$, приведенные на рис.2, получены для одинаковых значений плотности тока и потерь на выключение IGBT каждого класса. Важно понять, что снижение потерь в проводящем состоянии достигается исключительно благодаря расширению профиля распределения носителей вблизи эмиттера наряду с обеспечением той же толщины области дрейфа, что и у стандартной конструкции. Это гарантирует управляемое и "мягкое" переключение, что необходимо для модулей с высокой токовой нагрузкой. Уменьшение значения $V_{ce,sat}$ благодаря расширению профиля распределения носителей SPT+ ячеек в пределах от 15% для IGBT на напряжение 1200 В до 30% для IGBT на 4500 В приводит к соответствующему увеличению токового номинала.

МОДУЛИ С ВЫСОКОЙ ТОКОВОЙ НАГРУЗКОЙ

При разработке модулей на большие номиналы тока необходимо учитывать ряд проблем, связанных с конструкцией IGBT. Основная проблема создания IGBT модулей на высокие токи – обеспечение мягкого и управляемого переключения. Совокупность высоких токов и паразитных индуктивностей, как правило, приводит к перенапряжению и увеличению вероятности возникновения колебательных процессов при выключении. Накопленная индуктивная энергия E_L , рассеиваемая каждым IGBT чипом, определяется как

$$E_{L(чип)} = \frac{L \times I^2}{2},$$

где L – значение индуктивности и I – ток. Эта формула обычно используется для дискретных компонентов и компонентов на малые токи. Для модулей на высокие токи с n числом параллельно соединенных чипов (рис.3) формула определения эффективной индуктивной энергии чипа будет следующей:

$$E_{L(чип)} = \frac{E_{L(модуль)}}{n} = \frac{L \times (n \times I)^2}{n \times 2} = \frac{n \times L \times I^2}{2}.$$

Помимо увеличения значения эффективной индуктивности "nL", значение индуктивности рассеяния при коммутации больших токов также несколько возрастает. Из рис.3 видно, что для больших модулей накопленная индуктивностью энергия на один-два порядка выше, чем у одного прибора. Таким обра-

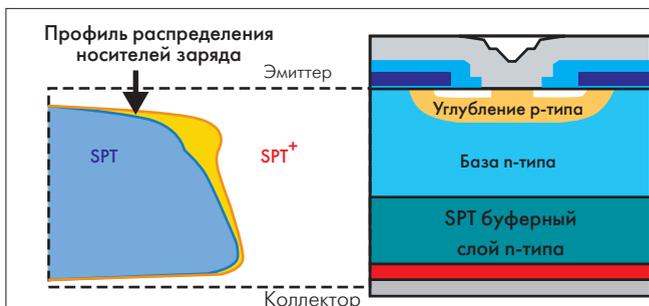


Рис.1. Расширенная конфигурация профиля распределения носителей заряда ячейки, выполненной по SPT+технологии, в сравнении с конфигурацией обычной SPT ячейки

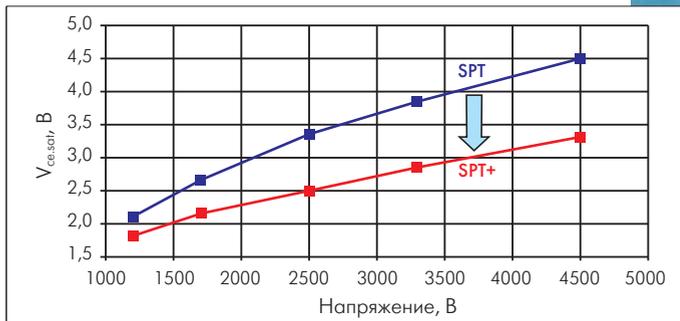


Рис.2. Зависимость падения напряжения SPT и SPT+ IGBT во включенном состоянии от класса транзистора по напряжению (температура 125°С)

зом, при корпусировании и определении назначения прибора необходимо принимать во внимание конструкцию IGBT чипа.

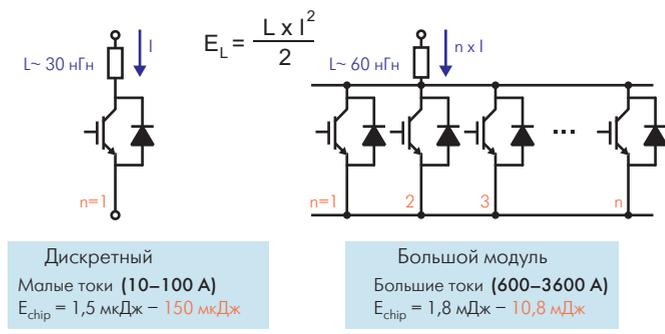


Рис.3. Эффективная индуктивность рассеяния для дискретных приборов и модулей

SPT+ HIPAK МОДУЛИ НА 3600 А/1700 В

Технология SPT+, сохраняя все достоинства SPT технологии, позволяет снизить потери проводимости.

Сравнение значений плотности тока и потерь стандартного SPT и нового SPT+ HiPak модулей показало, что при одинаковых значениях $V_{ce,sat}$ (при номинальном токе) допустимый ток SPT+ модуля больше (см. таблицу). В результате SPT+ модуль на ток 3600 А может быть выполнен на основе чипов тех же размеров, что и SPT модуль на меньший ток, или, соответственно, существующий SPT+ модуль на 2400 А – на основе чипов, размеры которых на 30% меньше размеров чипов SPT модуля. Характерные показатели двух технологий показаны на рис.4.

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Выходные характеристики модуля при 125°С приведены на рис.5. Падение напряжения модуля, выполненного по SPT+ технологии, в открытом состоянии при токе 3600 А составляет

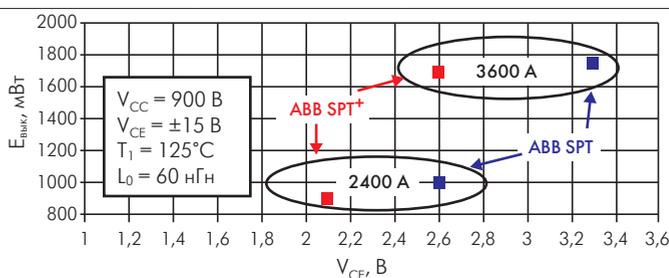


Рис.4. Зависимость энергии выключения от потерь в проводящем состоянии для модуля на 3600 А/1700 В

2,8 В, IGBT чипа – 2,6 В. Положительный температурный коэффициент $V_{ce,sat}$ новых IGBT модулей подобен этому параметру предыдущих серий (рис.6), что очень важно для обеспечения хорошего токораспределения при параллельном включении.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Для демонстрации электрических свойств SPT+ модулей на 3600 А/1700 В была проведена серия их динамических испытаний. На рис.7 и 8 представлены соответственно кривые включения и выключения при номинальных значениях напряжения и тока (900 В/3600 А) и температуре 125°C, на рис.9 – кривые обратного восстановления диода при 125°C. И IGBT, и диод модуля продемонстрировали управляемые характеристики переключения и короткий хвостовой ток. Это стало результатом применения SPT буферного слоя и модификации кремния, используемого в технологии SPT+, благодаря чему достигнуты высокие скорости коммутации, низкие уровни потерь и перенапряжений, а также высокая стойкость к электромагнитному воздействию.

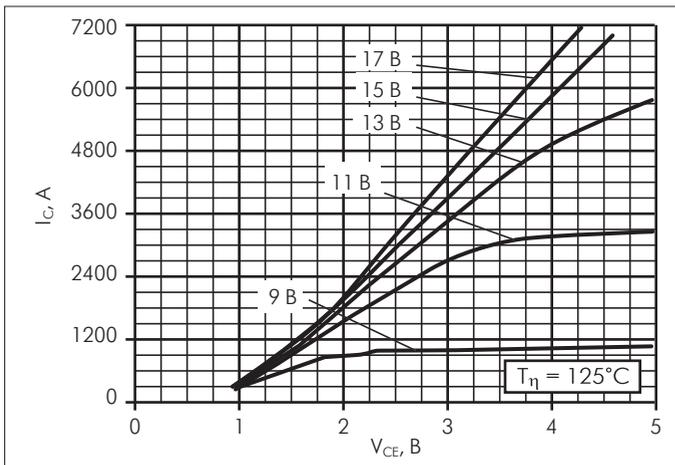


Рис.5. Выходные характеристики IGBT модуля 3600 А/1700 В с SPT+ элементами (температура 125°C)

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБР

Кривые ОБР IGBT и диода при выключении HiPak модуля на 3600 А/1700 В показаны на рис.10 и 11, соответственно. IGBT и диод испытывались при температуре 125°C и напряжении звена по-

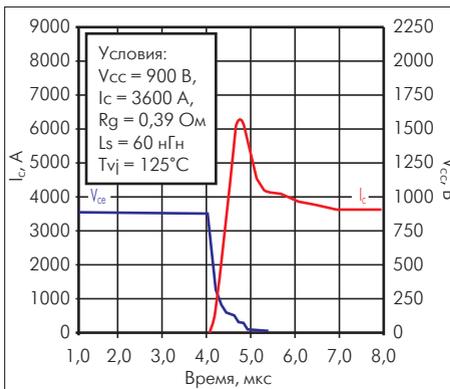


Рис.7. Кривые включения номинального режима IGBT модуля HiPak на 3600 А/1700 В при 125°C

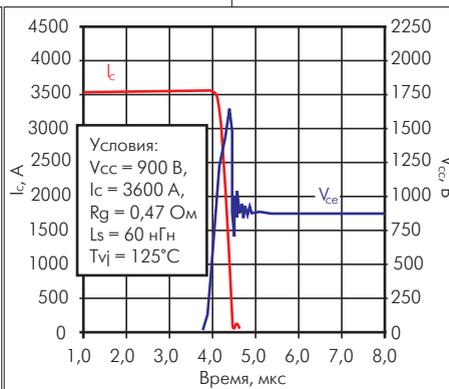


Рис.8. Кривые выключения номинального режима IGBT модуля HiPak на 3600 А/1700 В при 125°C

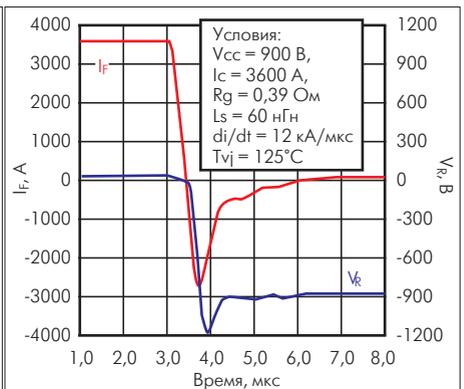


Рис.9. Обратное восстановление диода в номинальном режиме HiPak модуля на 3600 А/1700 В при 125°C

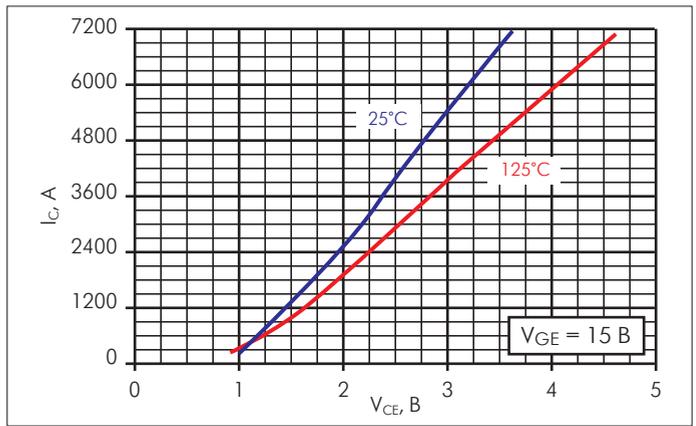


Рис.6. Характеристики модуля на 3600 А/1700 В с SPT+ элементами в открытом состоянии

стоянного тока 1200 В. Ток коллектора IGBT составлял 8000 А, прямой ток диода – 7200 А. Из приведенных кривых следует, что при выключении перенапряжение на IGBT благодаря самоограничению не превышало 2000 В.

Сравнение IGBT-модулей HiPak2 на 1700 В с SPT и SPT+ элементами

Параметр	ABB SPT	ABB SPT+	ABB SPT+
$V_{CE,нас}$, В	2,6	2,1	2,6
$E_{вык}$, Дж	1,0	0,9	1,7
$E_{вкл}$, Дж	0,7	0,4	0,7
$E_{перекл}$, Дж	1,7	1,3	2,4
I_{CN} , А	2400	2400	3600
Условия			
I_c , А	2400	2400	3600
V_{cc} , В	900	900	900
R_g вкл/выкл, Ом	0,56/0,56	0,39/0,47	0,39/0,47
L_s , нГ	60	60	60
$T_{перекл}$, °С	125	125	125

Результаты испытаний ОКЗ при 125°C и напряжении звена постоянного тока 1300 В приведены на рис.12. Значение тока короткого замыкания составляло 12 кА, что вполне приемлемо для такого режима. SPT буфер и конструкция анода диода SPT+ модуля были оптимизированы таким образом, чтобы получить широкую ОКЗ даже при напряжении затвора, превышающем стандартное значение 15 В. ОКЗ, полученная в результате испытаний, свидетельствует о высокой выносливости прибора в режиме короткого замыкания.

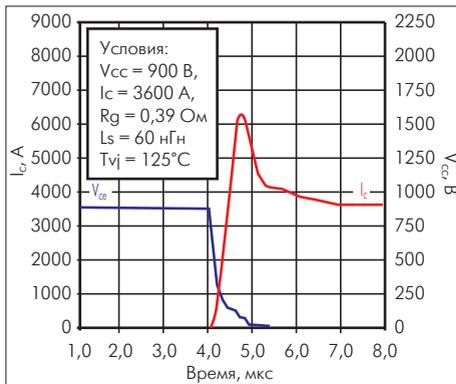


Рис. 10. ОБР IGBT HiPak на 3600 А/1700 В при 125°C

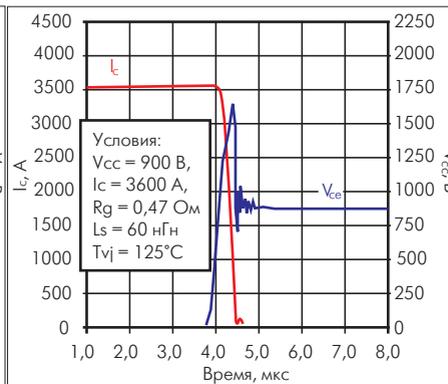


Рис. 11. ОБР диода модуля на 3600 А/1700 В при 125°C

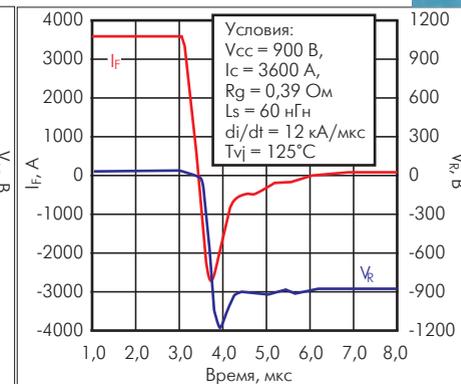


Рис. 12. ОБР диода модуля на 3600 А/1700 В при 125°C

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДУЛЯ НА 1700 В С SPT+ ЧИПАМИ

Для достижения максимально возможного выходного тока SPT+ модулей на 1700 В были смоделированы их частотные характеристики. Кривые зависимости выходного тока преобразователя с модулями HiPak SPT и SPT+ на 1700 В (рис. 13) демонстрируют явное увеличение выходной токовой нагрузки для SPT+ модуля во всем диапазоне частот переключений. Для SPT+ IGBT выходной ток может быть увеличен примерно на 10–20% в диапазоне частот коммутации от 250 до 1000 Гц при традиционном водяном охлаждении.

ВЫВОДЫ

В сравнении с SPT технологией SPT+ позволяет на 15–30% снизить потери IGBT-модуля в открытом состоянии и поддерживать уровень потерь при выключении примерно на том же уровне. Кроме того, SPT+ технология сопоставима с SPT по степени выносливости при коммутации и при коротких замыканиях. Электрические характеристики модуля HiPak на 1700 В подтвердили заявленные компанией ABB свойства нового поколения SPT+ приборов. Предложенный номенклатурный ряд приборов SPT+ HiPak предоставляет системным разработчикам большую свободу при реализации систем высокой мощности и эффективности. Компания ABB планирует осенью 2006 года начать поставки SPT+ HiPak-модулей в классах напряжения 1200–4500 В. Помимо IGBT класса 1700 В начаты опытные поставки модуля на напряжение 3300 В и ток 1500 А. Во втором полугодии изделия этого класса поступят на рынок вслед за классом 4500 В, и

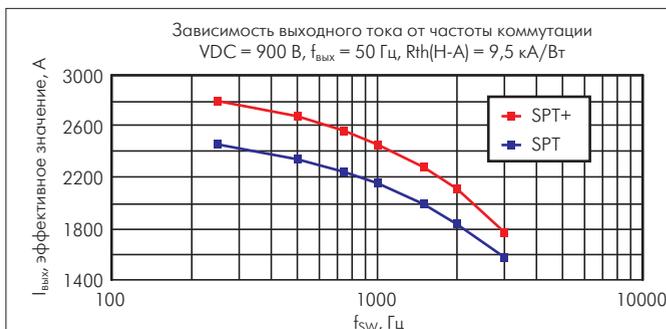


Рис. 13. Выходной ток преобразователя модуля HiPak на 1700 В в зависимости от частоты

с этого момента фактически начнется реализация всего номенклатурного ряда IGBT серии HiPak 1.

Материал подготовлен А.Чекмаревым (ЦПМК РУСТЭЛ) с согласия компании ABB Switzerland Ltd Semiconductors

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Rahimo et al. 2.5kV–6.5kV Industry Standard IGBT Modules Setting a New Benchmark in SOA Capability. – Proc. PCIM'04, NURNBERG, GERMANY, 2004, p.314–319.
2. M. Rahimo et al. SPT+, The Next Generation of Low-Loss HV-IGBTs. – Proc. PCIM'05, NURNBERG, GERMANY, 2004, p.361–366.