

Современная силовая электроника: разворот на Восток и «доступная функциональность»

Мир силовой электроники перевернулся, и мы перевернулись вместе с ним. Повышение стойкости к термоциклированию, борьба за каждый мВ статических потерь и каждый мДж динамических — эти вопросы, казавшиеся очень важными еще совсем недавно, отошли на задний план (будем надеяться, что не навсегда). Главная проблема, которую приходится решать теперь, — поиск доступных силовых модулей, способных выполнять необходимые функции, обеспечивая приемлемые показатели надежности. Можно сказать, что девизом современной российской электроники стала «доступная функциональность»...

Денис Новоторженцев

denis_n@npkexpert.ru

Андрей Колпаков

akolpakov@npkexpert.ru

Оглядываясь назад, мы с удивлением обнаруживаем, что пока мы качали нефть и газ, китайцы укрепляли финансовую систему, поднимали альтернативную энергетику и электро-транспорт, создавали микроэлектронику и силовую электронику. Китай превратился в действительно независимую державу, способную противостоять любым вызовам. И понятно, кто будет спасать нашу промышленность в ближайшие годы. Если захочет, конечно...

Мы планируем опубликовать серию статей, посвященных наиболее интересным китайским производителям силовой электроники. Начнем с компании Xiner Semiconductor, хорошо известной на внутрен-

нем рынке, как один из официальных поставщиков BYD — крупнейшего игрока на мировом рынке электротранспорта.

Знакомьтесь: Xiner Semiconductor

Компания Shenzhen Xiner Semiconductor Technology Co., Ltd. была основана в 2013 году. В ее создании принимали участие многие известные организации и институты Китая, в частности Государственная комиссия по надзору и администрированию в Шэньчжэне, Инновационный фонд талантов в Шэньчжэне, а также Dachen Venture Capital, Fangguang Capital, Xiamen Falcon и другие. Xiner занимается разработкой и производством чипов IGBT и модулей на их основе, интегральных драйверов затворов IGBT, а также маломощных интеллектуальных силовых модулей (IPM).

В команде Xiner — высококвалифицированные специалисты, имеющие большой опыт работы в электронной индустрии. Это первая компания в Китае, успешно разработавшая и начавшая массовое производство IGBT-модулей на основе технологии Trench FS четвертого поколения. Xiner располагает научно-исследовательскими центрами в Шанхае и Шэньчжэне, а офисы продаж, находящиеся в Шэньчжэне, Шанхае, Циндао, Шунде и Ханчжоу, способны динамично реагировать на запросы заказчиков, работающих в различных отраслях промышленности (рис. 1). Тот факт, что Xiner Semiconductor является поставщиком силовых модулей для электротранспорта, подтверждает высокую надежность продукции и гарантирует наличие необходимых для этого сертификатов.

Философия бизнеса Xiner ориентирована на сотрудничество в наиболее перспективных секторах

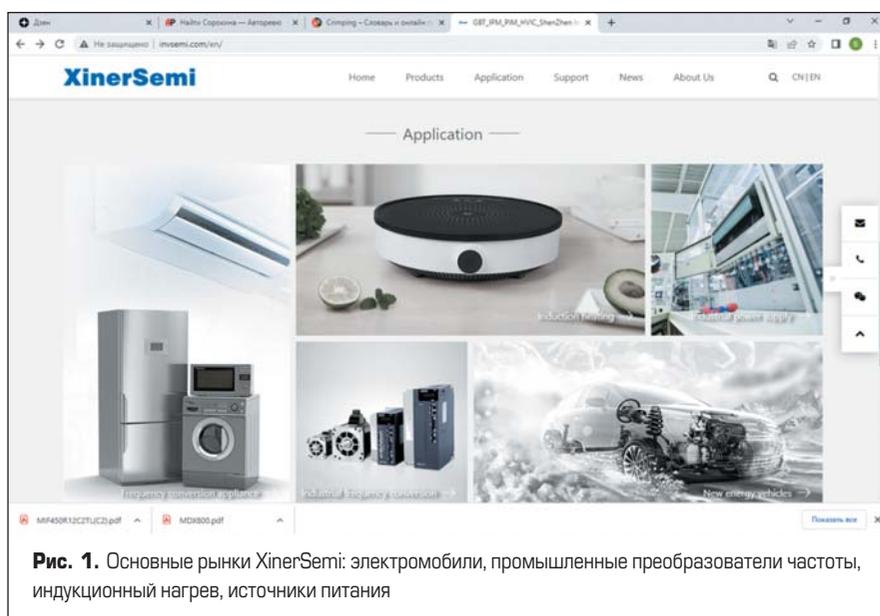


Рис. 1. Основные рынки XinerSemi: электромобили, промышленные преобразователи частоты, индукционный нагрев, источники питания

силовой электроники. Компания детально изучает требования клиентов, помогает в разработках мощных электронных преобразователей, поддерживает тесные связи с партнерами, имеющими наибольшие компетенции в данной отрасли.

Поскольку мы уже упомянули, что Xiner первым в Китае разработал собственную технологию Trench FS 4, то напомним читателям, что это такое и чем Trench отличается от других базовых структур IGBT.

Trench и другие технологии IGBT

Основными параметрами, по соотношению которых определяются базовые свойства кристалла IGBT и его «специализация», являются напряжение насыщения, заряд затвора и энергия переключения. Сегодня к наиболее распространенным технологиям IGBT относят NPT, SPT и Trench-FS, чьи основные особенности показаны на рис. 2 [4]. В модулях последних поколений чаще всего используются чипы Trench, обеспечивающие оптимальное сочетание статических и динамических потерь.

При производстве кристаллов NPT используется однородная диффузионная n-подложка толщиной около 200 мкм. Планарный затвор расположен на ее поверхности, а биполярный PNP-транзистор формируется добавлением слоя p⁺ в основание подложки. К достоинствам однородной NPT-структуры можно отнести высокую стойкость к короткому замыканию, положительный температурный коэффициент напряжения насыщения и прямоугольную область безопасной работы при обратном смещении RBSOA (Reverse Biased Safe Operating Area).

Чипы SPT содержат дополнительный буферный n⁺-слой, расположенный между подложкой и слоем p⁺. Буфер повышает стойкость транзистора к пробое, опасность которого возрастает из-за уменьшения толщины подложки. Меньшая толщина кристалла SPT позволяет снизить потери проводимости, структура затвора у них — стандартная планарная (как у NPT-IGBT).

У SPT IGBT оптимизированы характеристики выключения: напряжение нарастает линейно, переходный процесс более плавный, меньше уровень коммутационного перенапряжения, сокращен «хвост» тока. Энергия переключения транзисторов SPT ниже, чем у NPT IGBT, площадь кристалла и тепловые характеристики соизмеримы.

Однако практически все современные IGBT производятся по технологии Trench-FS. Они также имеют буферный n⁺-слой в основании, как показано на рис. 2в. Принципиальное отличие этого типа кристаллов состоит в структуре затвора, выполненного в виде глубокой канавки (trench) в теле подложки. В сочетании с модифицированной конструкцией эмиттера это позволяет оптимизировать распределение носителей в области подложки. В результате напряжение насыщения транзисторов Trench-FS на 30% ниже, чем у NPT, а размер чипов — меньше почти на 70%, то есть плотность тока намного больше. С появлением четвертого поколения Trench IGBT данный показатель увеличился с 85 А/см² (SPT IGBT) и 115 А/см² (T3 IGBT) до рекордного уровня 130 А/см².

Для повышения перегрузочной способности IGBT их максимальная рабочая температура T_{jmax} должна быть не менее +175 °С — такое требование предъявляют, в частности, производители транспортных приводов. Если учесть, что стандартным «тепловым запасом» в режиме перегрузки считается +25 °С, то для кристаллов Trench 4 номинальная рабочая температура в длительном режиме работы составляет +150 °С. В пересчете на выходную мощность трехфазного инвертора это означает прибавку не менее 20% по сравнению с модулями предыдущих поколений, у которых величина T_{jmax} была ограничена +150 °С.

При разработке технологии Trench 4 были оптимизированы основные элементы вертикальной структуры: n-базы, n-Field Stop-слоя, предназначенного для повышения напряжения пробоя, и эмиттера. При производстве чипов Xiner используется новый технологический процесс сверхтонких пластин (Ultra Thin Wafer Process). Это позволило снизить суммарные потери в широком диапазоне частот более чем на 30%, увеличить плотность мощности и обеспечить более плавный характер переключения.

В таблице 1 приведены основные характеристики IGBT различных типов, определяющие мощность потерь. Для корректности сопоставления значения параметров SPT и Trench 3 даны при температуре

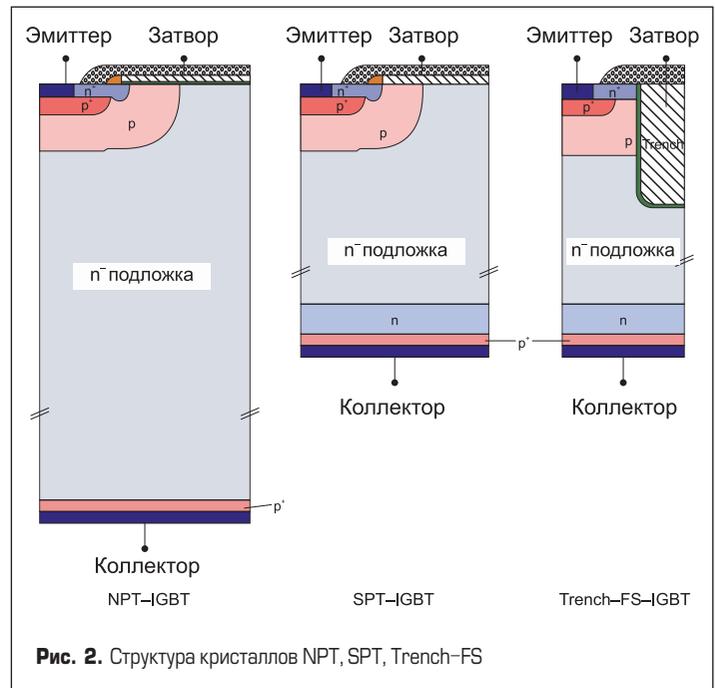


Рис. 2. Структура кристаллов NPT, SPT, Trench-FS

T_j = +125 °С, а для чипов четвертого поколения добавлены соответствующие величины для T_j = +150 °С.

Справедливости ради отметим, что ведущие европейские и японские производители силовой электроники не так давно представили на рынке модули Trench IGBT следующего, седьмого поколения. У Xiner и других китайских компаний таких пока нет, но думаем, что освоение этой технологии не займет много времени. Вспомним, как еще совсем недавно мы смеялись над китайскими автомобилями...

Xiner Semiconductor: номенклатура

Нельзя сказать, что Xiner предлагает очень широкую номенклатуру модулей, однако выпускаемая продукция покрывает большую часть потребности рынка промышленных приводов средней и высокой мощности.

Таблица 1. Характеристики различных типов IGBT (чип 1200 В/100 А)

Параметр, единица измерения	SPT IGBT	Trench IGBT3	Trench IGBT4 +125 °С/+150 °С
Напряжение насыщения V _{CEsat} , В (@ I _{Cном} , +25 °С)	1,9	1,7	1,8
Напряжение насыщения V _{CEsat} , В (@ I _{Cном} , +125 °С)	2,1	2,0	2,1/2,2
Энергия переключения E _{sw} , мДж (@ +125 °С)	22	27	19/21
Заряд затвора Q _G , мкКл (@ V _{GE} = -8/+15 В)	1,2	0,9	0,57
Температура кристалла T _{jmax} , °С	150	150	175

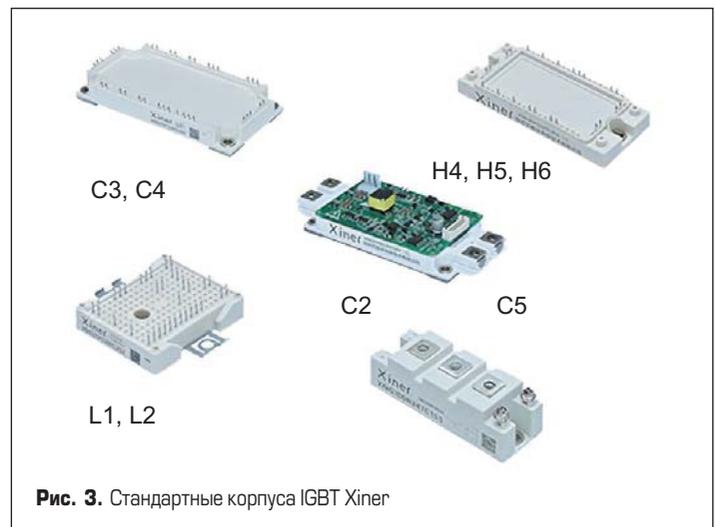


Рис. 3. Стандартные корпуса IGBT Xiner

Таблица 2. Номенклатура силовых модулей Xiner

Тип модуля	Рабочее напряжение, В	$I_{C(nom)}$, А		Корпус	Размеры, мм	Конфигурация
		$I_{F(nom)}$, А				
XNG***PI12TL1S3	600	20–30		L1	34×48×15	PIM (трехфазный выпрямитель)
XNG15PI24TL1S3	1200	15		L1	34×48×12	PIM (трехфазный выпрямитель)
XNG***PI24TL2S3	1200	25–40		L2	57×48×12	PIM (трехфазный выпрямитель)
XNG***PI24TC3AS3	1200	25–50		C3	107×45×17	PIM (трехфазный выпрямитель)
XNG***PI24TC4AS5	1200	50–100		C4	122×62×17	PIM (трехфазный выпрямитель)
XNG***D24KC4A5	1200	150–200		C4	122×62×17	SixPack IGBT (трехфазный инвертор)
XNG***B24TC1S5	1200	50–150		C1	94×34×30	Полумост IGBT
XNG***B24KC2S5	1200	200–450		C2	106×62×30	Полумост IGBT
XNG***B34KC2S8	1700	200–300		C2	106×62×30	Полумост IGBT
XNG***B24KC5A5	1200	300–600		C5	152×62×17	Полумост IGBT
XNG***B34KC5A8	1700	300–600		C5	152×62×17	Полумост IGBT
XNG***D13TH4A3	650	300–400		H4	140×112×17	SixPack IGBT (трехфазный инвертор)
XNG400D13TH6A3	650	400		H6	140×72×17	SixPack IGBT (трехфазный инвертор)
XNG660D13TH5A3	650	660		H5	152×92×15	SixPack IGBT (трехфазный инвертор)

Примечание. *** — цифра совпадает с номинальным током модуля.

Это трехфазные выпрямители, трехфазные и полумостовые модули IGBT в стандартных корпусах (рис. 3), а также интегральные драйверы затворов. Основные параметры силовых ключей Xiner представлены в таблице 2.

В линейке продукции Xiner также представлены интеллектуальные силовые модули (IPM), имеющие в своем составе не только силовой каскад, но и драйвер затвора со всеми необходимыми функциями защиты. Xiner предлагает IPM с рабочим напряжением 600 и 1200 В в диапазоне токов 3–50 А, которые выпускаются в малогабаритных корпусах DIP23, SOP23, PQFN, DIP24, DIP25, DIP26, DIP29 (рис. 4).

Xiner Semiconductor: попробуем сравнить

Сравнение характеристик модулей, изготовленных различными фирмами (особенно европейскими и азиатскими), — неблагодарное дело. Опытные специалисты знают, что, например, такой важный параметр, как тепловое сопротивление R_{th} , по-разному нормируется у разных производителей, что создает почву для махинаций и злоупотреблений со стороны недобросовестных продавцов. Однако для грамотных инженеров, знающих как «читать datasheet между строк» [4], это не будет проблемой. Поэтому мы не станем сравнивать величины R_{th} , тем более что тепловое сопротивление $R_{th(c-s)}$ — в первую очередь характеристика конструктива и не может сильно отличаться у модулей в корпусах 62 мм или Econo-Dual, производимых с применением стандартных технологий пайки и ультразвуковой сварки.

Толерантность не позволяет европейским производителям указывать конкретные названия сравниваемых компонентов, вместо этого они пишут Competitor 1, Competitor 2 и т. д. (то есть конкурент 1, конкурент 2). Не будем нарушать это правило и сопоставим основные характеристики наиболее востребованного на рынке мощных приводов полумостового IGBT-модуля Econo-Dual 1200 В/450 А компании Xiner (XNG450B24KC5A5) с одним из лучших европейских аналогов. Опытный специалист сразу поймет, о чем идет речь. Полученные результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3. Сравнительные характеристики модулей IGBT Trench 4 (1200 В/450 А), корпус Econo-Dual

Тип модуля	I_{CRM} , А	$V_{CE(sat)}$, В & $T_j = +25/150$ °С	E_{on}/E_{off} , мДж & $T_j = +150$ °С	E_{rr} , мДж & $T_j = +150$ °С	Q_g , мкКл
EU Trench 4	1450 ($3 \times I_{Cnom}$)	1,8/2,19	25/57	37	3,3*
XNG450B24KC5A5	900 ($2 \times I_{Cnom}$)	1,75/2,05	43/51	24	1,62*

Примечание. *Величина Q_g нормирована для $V_{GE} = \pm 15$ В.

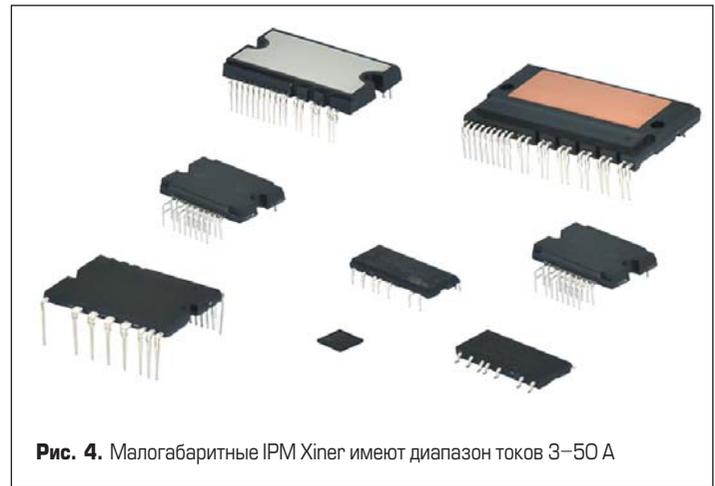


Рис. 4. Малогабаритные IPM Xiner имеют диапазон токов 3–50 А

Мы сознательно (чтобы не отдавать никому предпочтения) включили в таблицу пиковый ток перегрузки I_{CRM} равный тройному номинальному току у европейского модуля и только двойному значению I_{Cnom} у IGBT Xiner. Напомним, что точно так же ($2 \times I_{Cnom}$) величина I_{CRM} определялась для предыдущего, третьего поколения европейских IGBT. Скорее всего, причиной этого являются устаревшие условия нормирования. Тем более что опытные специалисты прекрасно понимают, что сам по себе параметр I_{CRM} не имеет большого практического значения, так же, как и I_{Cnom} .

Напомним, что согласно договоренности ведущих производителей IGBT величина I_{Cnom} также указываемая в названии модуля, определяется производителем чипа на основании технологических коэффициентов. То есть если в модуле установлено три параллельных кристалла с номинальным током 150 А, то в спецификации будет указано $I_{Cnom} = 450$ А. Реальный ток силового ключа в конкретных условиях применения определяется только тепловым расчетом для определенных режимов работы и охлаждения. На наш взгляд, лучшим инструментом для такого расчета является SEMISEL [5], тем более что локальные версии программы, начиная с версии 3.1, позволяют создавать тепловые модели на основе технических спецификаций (опция User Defined Model).

Анализ остальных параметров в таблице 3 гораздо интереснее и полезнее. Как видно из таблицы, статические потери XNG450B24KC5A5 чуть ниже, чем у европейского аналога, а динамические — немного выше. Однако энергия восстановления тельного диода у модуля Xiner заметно меньше, что дает ему преимущество в определенных режимах работы. Также гораздо ниже у него суммарный заряд затвора Q_g — это уменьшает мощность, рассеиваемую драйвером, что особенно важно при параллельном соединении IGBT.

Как уже было отмечено, ведущие европейские и японские компании начали выпуск силовых ключей седьмого поколения, отличающихся улучшенными статическими характеристиками. У китайских производителей, в частности Xiner, таких пока нет. Однако сравнительные испытания модулей XNG450B24KC5A5 в составе трехфазного инвертора, проведенные нашими партнерами, показали, что в номинальных режимах на частоте ШИМ = 3 кГц перегрев чипов не превышает 10 °С относительно IGBT Gen.7. В нынешних условиях такой результат можно считать вполне приемлемым.

Вместо послесловия, или Немного о китайском менталитете

Для инженеров, имеющих опыт общения с европейскими специалистами (в первую очередь с немецкими, как у авторов этих строк), знакомство с «китайским» вариантом технической поддержки вызывает, мягко говоря, удивление. На сайте компании вы можете обнаружить техниче-

ские спецификации (datasheet) только на китайском языке или вообще не найти их! А на запрос вам ответят, что документация предоставляется только после размещения заказа. Возникает вопрос: как можно заказывать силовой модуль, не имея на него технической информации? А вот так. Этот вопрос очевиден для нас, но не для китайцев — существ с другой планеты... Что касается любезных нашему сердцу технических описаний и руководств по применению (Technical Explanations, Application Notes), то их, скорее всего, вы не обнаружите вообще.

Разобраться с подобными восточными странностями нам помогла замечательная книга «Китай. Культурный шок» [6], написанная Вадимом Чекуновым — филологом, много лет прожившим в Китае и хорошо знающим эту страну. В двух словах особенности китайского менталитета можно объяснить следующим образом. На планете Земля есть «Срединное Государство» (именно так переводится самоназвание Китая), где живут люди — китайцы. И есть весь остальной мир, населенный **лаоваями**. Даже не пытайтесь понять, что это такое, просто смиритесь с мыслью, что вы — ЛАОВАИ.

Читатели старшего поколения помнят, как по приказу Мао китайцы истребляли воробьев, чтобы поднять урожайность, и выплавляли во дворах чугуна, когда стране не хватало металла. И это не анекдот, это страница недавней истории.

В Китае заблокированы Youtube и Facebook, не работают наши любимые Telegram и WhatsApp. Однако китайцы от этого абсолютно не страдают, они пользуются своим мессенджером WeChat, подписчиков у которого больше, чем у всех остальных вместе взятых.

В описании основных принципов работы Xiner указано (дословный перевод), что «компания нацелена на сотрудничество с китайскими разработчиками систем, разрушение иностранных монополий и формирование реальной боевой мощи отечественных производителей»!

Китайская силовая электроника в первую очередь ориентирована на внутренний рынок, и свои собственные проблемы их занимают гораздо больше, чем все прочие. Нам бы так. А мудрая обезьяна будет и дальше сидеть на горе и смотреть, как тигры в долине рвут друг друга на части...

Продолжение следует

Литература

1. Материалы сайта www.invsemi.com/
2. Колпаков А. Контрольная точка, или Как читать datasheet между строк. Часть 1 // Электронные компоненты. 2006. № 6.
3. Колпаков А. Контрольная точка, или Как читать datasheet между строк. Часть 2 // Электронные компоненты. 2006. № 9.
4. Колпаков А. NPT, SPT, Trench... Что дальше? // Электронные компоненты. 2006. № 3.
5. Колпаков А. «SEMISEL 3.1 — новые возможности». // Силовая электроника. 2008. № 3.
6. Чекунов В., Савулькин Г. Китай. Культурный шок. М.: АСТ, 2019.