

Современная силовая электроника:

разворот на Восток
и «доступная функциональность».
Часть 6. SilverMicro

Мы продолжаем рассказывать о наиболее интересных производителях компонентов силовой электроники из Китая. Предыдущие статьи, посвященные компаниям Xiner, Novosense, Firstack, AnXon, Zenli, опубликованы в журнале «Силовая электроника» №1–5, 2023 [1].

Вполне возможно, что большинство читателей, увидев эту статью, скажет: «Еще один китаец, что здесь может быть нового?». Однако не торопитесь: в море производителей силовых модулей из Поднебесной не так много компаний, имеющих не только мощную производственную и испытательную базу, но и собственную технологию чипов и возможность их массового изготовления. Одним из таких игроков на рынке китайской силовой электроники является фирма Nanjing SilverMicro Electronics (далее — SilverMicro), специализирующаяся на выпуске электронных компонентов для промышленного применения.

Андрей Колпаков

akolpakov@unirec.ru

**Главная интрига:
что внутри у китайских IGBT?**

Этот вопрос коснулся практически всех, кто занимается разработкой и изготовлением преобразовательных устройств и вынужден искать замену силовым модулям европейского и японского производства среди их китайских аналогов. На первый взгляд это несложная задача — на рынке доступно огромное количество компонентов от различных компаний, можно найти практически любой корпус, класс тока и напряжения.

Однако более детальный анализ (которым автор этих строк занимается уже почти два года) показывает, что в силовых ключах с абсолютно одинаковым названием могут стоять чипы разных производителей, с разными характеристиками. Более того, может отличаться и топология DBC-подложки, что неизбежно влияет на тепловое сопротивление кристалл-корпус $R_{th(j-c)}$, хотя в технической спецификации (datasheet) это никогда не отражается. Самым неприятным сюрпризом, с которым мы столкнулись при испытаниях мощного инвертора, содержащего несколько параллельных IGBT в фазе, был огромный небаланс токов (до 20%!) у модулей с одинаковым дата-кодом.

По поводу происхождения кристаллов IGBT и FWD в лучшем случае производитель сообщит вам, что они импортные (как правило, японские) или «локальные» (то есть китайские). Что отвечают

на такой вопрос многочисленные «официальные представители» (которые, как известно, ни за что не отвечают) — об этом и говорить не хочется. Один из наших азиатских партнеров (у которого как раз все прозрачно в отношении чипов) объяснил, что подобная «мутная концепция», к сожалению, характерна для китайских компаний.

Как правило, силовые ключи с японскими чипами заметно превосходят по техническим характеристикам модули с кристаллами «местного» производства. Хорошая новость состоит в том, что собственные технологии развиваются в Китае очень быстро и последние версии чипов, в частности IGBT Trench 4, ведущих производителей уже почти не уступают мировым стандартам. Одним из таких производителей является Nanjing SilverMicro Electronics.

Знакомьтесь: SilverMicro

Компания SilverMicro была основана в 2007 году всемирно признанным экспертом на рынке силовой электроники — доктором Майклом Чжуангом (Dr. Michael Zhuang) и его командой. Доктор Чжуанг имеет более чем двадцатилетний опыт проектирования силовых приборов и преобразовательных систем на их основе, он также является ведущим специалистом в области технологий силовой электроники. Фирма находится в промышленном парке SilverMicro площадью более 80 000 м² — в зоне экономического развития Лишуй, Нанкин (Lishui, Nanjing).

Производственные и офисные здания, а также научно-исследовательские корпуса занимают более 20 000 м², включая чистые помещения площадью 2100 м². В 2022 г. фирмой было изготовлено более 2,5 млн IGBT-модулей.

SilverMicro внедряет передовые технологии производства силовых ключей и использует самое современное оборудование для тестирования характеристик IGBT с рабочим напряжением до 3,3 кВ. С 2009 года вся продукция компании соответствует требованиям стандартов ISO 9001 и ISO14001, большинство компонентов имеет сертификат UL. В 2016 году получен сертификат TS16949, соответствующий международному автомобильному стандарту IATF 16949. Теперь SilverMicro имеет возможность на своем оборудовании проводить квалификационные испытания надежности силовых модулей в условиях жестких воздействий окружающей среды.

SilverMicro: номенклатура

Командой SilverMicro, следующей девизу «Инновации и совершенствование», сегодня разработано более десяти конструктивных платформ и получено свыше 20 патентов. Продукция компании находит применение в промышленных инверторах, сварочных аппаратах, мощных источниках питания и ИБП, а также в новых энергетических системах (рис. 1, 2). Разработка специализированных решений по требованиям заказчиков также является сильной стороной SilverMicro, специалисты которой создали серию нестандартных силовых модулей, предназначенных для особо сложных применений.

Кроме широкой гаммы стандартных силовых ключей в промышленных корпусах (основные параметры приведены в таблице 1), SilverMicro выпускает модули для электротранспорта в конструктиве B8 (аналог Hybrid Pack, рис. 1). SME B8 — это специализированный силовой ключ семейства Hybrid, предназначенный для применения в тяговых приводах гибридного и электрического транспорта мощностью до 180 кВт. Модуль выполнен в конфигурации Six-Pack (трехфазный инвертор) на основе технологии Infineon Trench FS IGBT 1200 В/600 А, обеспечивающей оптимальное сочетание потерь проводимости и переключения. При разработке конструктива SME B8 использованы новейшие материалы и технологии корпусирования. Модуль имеет базовую плату pin-fin, предназначенную для прямого жидкостного охлаждения, что значительно улучшает стойкость компонента к воздействию термоциклов, обеспечивает высокую плотность мощности и расширенный ресурс.

Использование высокоэффективной керамической DBC-подложки и усовершенствованной технологии сварки проводниковых соединений чипов способствует улучшению характеристик пассивного и активного термоциклирования, что считается необходимым требованием для тяговых приводов. Расположение сигнальных выводов позволяет установить драйвер в верхней части модуля, все силовые терминалы имеют винтовое соединение.

Таблица 1. Модули IGBT SilverMicro и их основные характеристики

Конфигурация	V _{CE} , В	I _C , А	Корпус
PI-CIB (выпрямитель/инвертор/чоппер)	600, 650, 1200	10–100	B2, B3, B9, C6, C7, T5, T6
FF (трехфазный инвертор)	650, 1200	10–400	A1, A6, A8, B3, B9, C6, C7, T5, T6
FB (трехфазный инвертор/чоппер)	600, 1200	10–75	A1, B3, C7
НН (Н-мост)	650, 1200	35–200	A1, A7, B3, C7, T5, T6
HF (полумост)	650, 1200, 1700	40–1000	A4, A5, B1, P3, P4, T1, T2, T8, T9
SD (одиночный ключ)	650, 1200, 1700	50–3600	A2, B5, T2, T3, T4
CU, CL, DF, FD (чопперы, группы из трех чопперов)	650, 1200, 1700	50–600	A5, B5, T1, T2, T9
TL, TAR, TT, MAR, MCR (трехуровневые модули в разных конфигурациях)	650, 1200	50–600	A8, B2, B3, B9, T2, T7
IPM (интеллектуальные модули IGBT)	600, 1200	5–50	A7

Компоненты семейства SME B8 проходят полный цикл квалификационных испытаний в соответствии с современными требованиями автомобильной промышленности.

SilverMicro: попробуем сравнить

Как уже было сказано, в отличие от многих производителей из Поднебесной, SilverMicro

не скрывает происхождения чипов. До тех пока уровень китайских IGBT-технологий отстает от мировых лидеров, SilverMicro использует кристаллы последних поколений MTM и Renesas, и это четко отражается в названии компонентов. Вместе с ними изготавливаются и силовые ключи с чипами, производимыми партнером SilverMicro — компанией Huahong (Group) Co., Ltd.

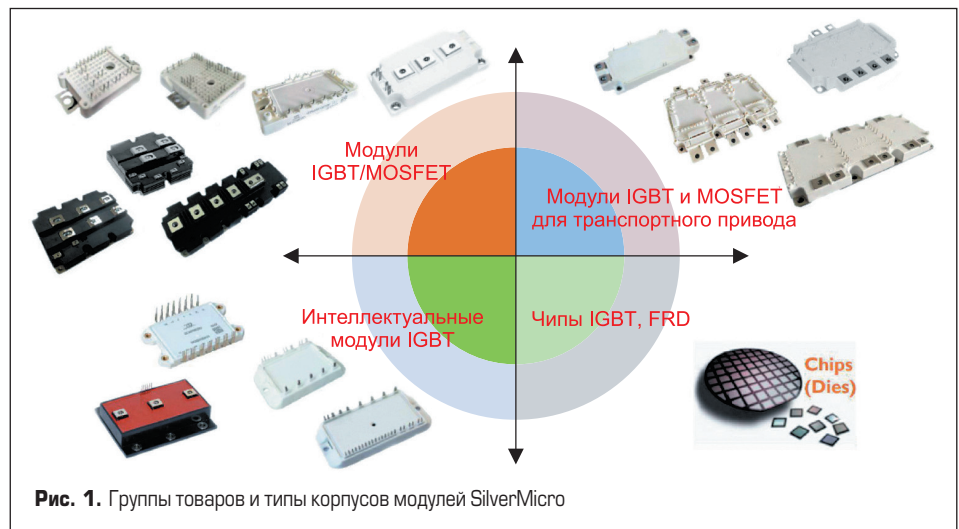


Рис. 1. Группы товаров и типы корпусов модулей SilverMicro



Рис. 2. Основные рынки SilverMicro: промышленные приводы, электромобили, источники питания и ИБП, сварочное оборудование и индукционный нагрев

Таблица 2. Сравнительные характеристики модулей IGBT Trench 4 (1200 В/450 А), корпус Econo-Dual

Тип модуля	I_{CRM}, A $T_j = 175^\circ C$	$V_{CE(sat)}, B$ $T_j = 25/150^\circ C$	$E_{on}/E_{off}, мДж$ $T_j = +150^\circ C$	V_F, B $T_j = +150^\circ C$	$Q_G, мкКл$ $V_{GE} = \pm 15 B$
EU Trench 4	1450 ($3 \times I_{Cnom}$)	1,8/2,19	25/57	1,65	3,3
GT450HF120T9H	900 ($2 \times I_{Cnom}$)	1,75/2,3	47/60	1,95	4,3
GT450HF120T9H-M	900 ($2 \times I_{Cnom}$)	1,7/2,0	26/62	1,5	2,3

Huahong Group — это государственная китайская промышленная группа по выпуску 8- и 12-дюймовых пластин с применением собственных передовых технологий. Основное производство распределено по четырем площадкам, где действует три линии изготовления 8-дюймовых пластин и три 12-дюймовые линии. В настоящее время в Huahong Group занято более 10 000 сотрудников, сформировавших профессиональную команду международного уровня. Об этом говорит тот факт, что за время работы сотрудниками группы подано 17 000 патентных заявок.

В первой статье цикла, посвященной продукции Xiner [1], мы упомянули, что сравнение характеристик модулей, выпускаемых различными фирмами (особенно европейскими и азиатскими), — неблагодарное дело. Опытные специалисты знают, что, например, такой важный параметр, как тепловое сопротивление R_{th} , у разных производителей нормируется по-разному, что создает почву для махинаций и злоупотреблений со стороны недобросовестных продавцов. Однако для грамотных инженеров, знающих, как «читать datasheet между строк» [3], это не является проблемой.

Следуя правилам сравнения, изложенным в статье про Xiner, сопоставим основные характеристики двух вариантов наиболее востребованного на рынке мощных приводов полумостового IGBT-модуля EconoDual 1200 В/450 А компании SilverMicro (с собственным и японским чипами IGBT) с одним из лучших европейских аналогов. Опытный специалист сразу поймет, о чем идет речь, результаты представлены в таблице 2.

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 SilverMicro. 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: 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 указывается 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 выявляется только путем теплового расчета для определенных режимов работы и охлаждения. *На наш взгляд, лучшим инструментом для такого расчета является SEMISEL [4], тем более что локальные версии программы, начиная с версии 3.1, позволяют создавать тепловые модели на основе технических спецификаций (опция User Defined Model).*

Как видно из таблицы 2, статические и динамические потери силового ключа SilverMicro с собственным кристаллом несколько выше, чем у европейского «эталона». Однако у модуля с японским чипом (GT450HF120T9H-M) напряжение насыщения $V_{CE(sat)}$ и прямое напряжение диода V_F уже заметно меньше, что дает ему ощутимые преимущества в приводных применениях. При этом по уровню динамических потерь ($E_{on} + E_{off}$) он находит-

ся на уровне европейского аналога. Также у GT450HF120T9H-M заметно ниже суммарный заряд затвора Q_G — это уменьшает мощность, рассеиваемую драйвером, что особенно важно при параллельном соединении IGBT.

SilverMicro: новые технологии

Для соответствия растущим требованиям современного рынка силовой электроники компания SilverMicro уделяет большое внимание внедрению новых технологий и улучшению показателей надежности.

- Соединение медных проводников с медными шинами существенно улучшает токовые характеристики силовых модулей.
- Технология спекания нанопорошка Ag для установки чипов заметно снижает тепловое сопротивление и повышает стойкость к термоциклированию.

На рис. 3 показаны особенности новейших процессов ультразвуковой сварки проводников чипов и технологии спекания Ag для их монтажа на DBC-подложку, позволяющие существенно улучшить тепловые характеристики силовых ключей и повысить их надежность. Оба технологических процесса планируется использовать при производстве перспективных транспортных модулей.

Еще одно важное отличие SilverMicro от многих азиатских производителей — тщательный контроль технологических процессов, что приближает эту компанию к мировым лидерам. В частности, выполняется тотальный рентгеновский контроль качества паяного слоя кристаллов, а также 100%-ный контроль статических параметров и границ области безопасной работы (RBSOA).

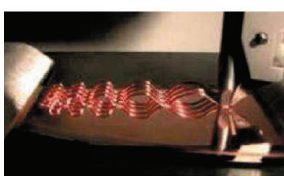
Как и другие ведущие производители силовой электроники, SilverMicro проводит испытания, подтверждающие показатели надежности выпускаемой продукции в соответствии со стандартом AEC-Q101, в частности:

- статический тест при обратном смещении коллектора и повышенной температуре (HTRB, 1000 ч);
- статический тест при обратном смещении затвора и повышенной температуре (HTGB, 1000 ч);
- статический тест при обратном смещении коллектора при повышенной температуре и влажности (H3TRB, +85°C/85%);
- тест на воздействие пассивных и активных термоциклов.

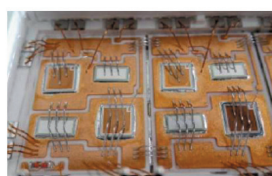
Продолжение следует

Литература

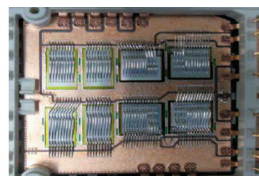
1. Колпаков А., Новоторженцев Д. Современная силовая электроника: разворот на Восток и доступная функциональность // Силовая электроника. 2023. № 1–5.
2. Материалы сайта www.njsme.com
3. Колпаков А. Контрольная точка, или Как читать datasheet между строк. Часть 1 и 2 // Электронные компоненты. 2006. № 6, 9.
4. Колпаков А. SEMISEL 3.1 — новые возможности // Силовая электроника. 2008. № 3.



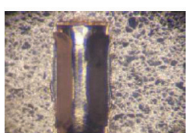
Сварка медных проводников



Чипы IGBT с медной металлизацией



U3-сварка проводников с медными шинами



- Соединение медных проводников с медными шинами существенно улучшает токовые характеристики силовых модулей.
- Технология спекания нанопорошка Ag для установки чипов заметно снижает тепловое сопротивление и повышает стойкость к термоциклированию

Рис. 3. Новые технологии подключения кристаллов SilverMicro