



Станислав Флоренцев

# Современное состояние и прогноз развития приборов силовой электроники

В статье описано современное состояние в сфере разработок приборов силовой электроники. Особое внимание уделяется MOSFET и IGBT-модулям, которые широко используются практически во всех видах современного преобразовательного оборудования. Рассматривается также положение дел на российском рынке силовой электроники.

Силовая электроника является ключевой технологией 21 века. За последние годы предыдущего столетия с появлением и развитием полностью управляемых приборов значительно расширились области применения силовой электроники, охватывающей в настоящее время практически все сферы жизнедеятельности человека — топливно-энергетический комплекс, промышленность, транспорт, связь,

авиацию, космос, военную технику, быт и т.п. Самой большой и важной областью применения приборов силовой электроники является электропривод.

На сегодня среди всех типов приборов силовой электроники (рис. 1) доминируют два: полевые и биполярные транзисторы с изолированным затвором (MOSFET и IGBT) и интегрированные структуры на их основе — силовые интегральные схемы и гибрид-

ные модули [1-5]. Традиционные приборы, с которых начиналась силовая электроника: тиристоры (SCR), включая запираемые (GTO), биполярные транзисторы (BPT), — в последние годы всё больше и больше вытесняются приборами с полевым управлением и в ближайшее время будут находить применение только в областях, где параметр «коммутируемая мощность/цена» является определяющим: для BPT — ключевые источники питания (SMPS), для SCR и триаков — бытовая аппаратура.

Динамика развития мирового рынка приборов силовой электроники в дискретном и модульном исполнении представлена на рис. 2 [IMS (Intex Management Services) Report-2002].

Структура рынка приборов силовой электроники в 2003 г. по типам приборов представлена на рис. 3 (За — дискретные приборы, Зб — силовые модули) [IMS-2002].

## Выпрямительные диоды

Предельные характеристики на сегодняшний день для выпрямительных диодов составляют 10 кВ/8 кА. Совершенно очевидно, что выпрямительные диоды будут занимать существенную часть в большинстве силовых элек-

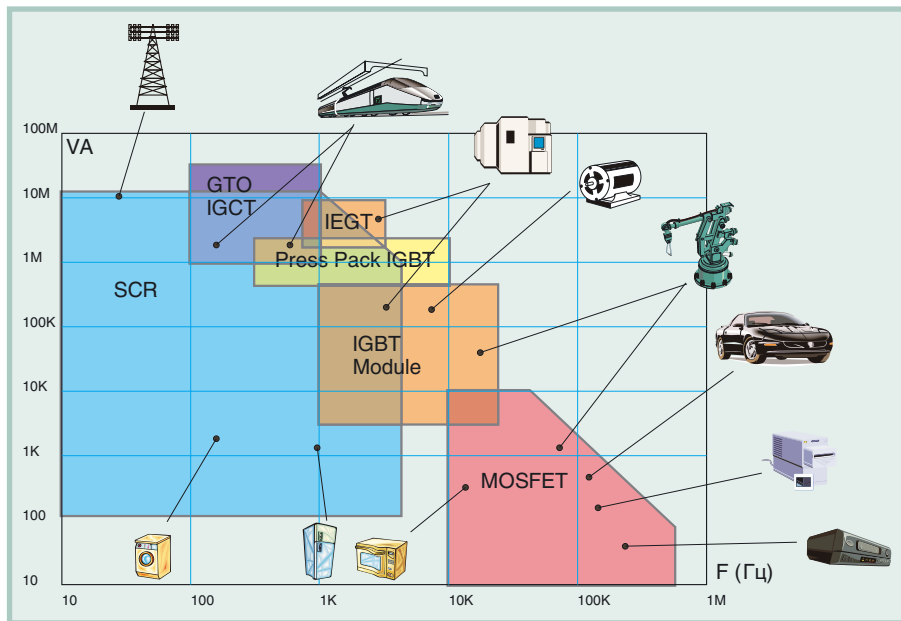


Рис. 1. Области применения приборов силовой электроники

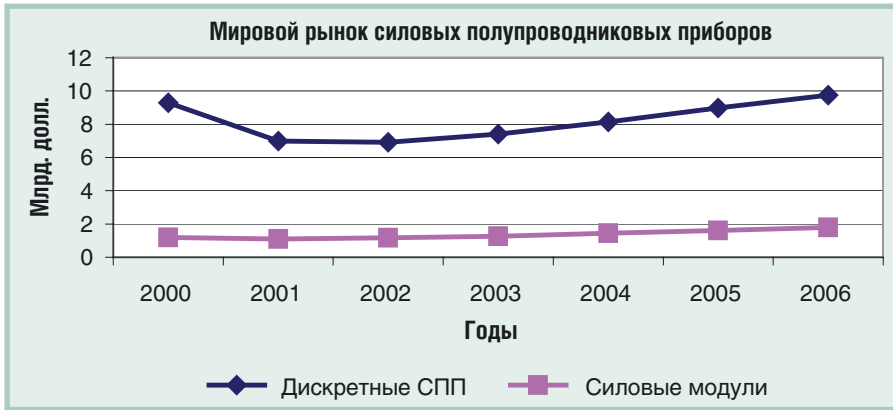


Рис. 2. Динамика развития мирового рынка приборов силовой электроники

тронных систем также и в будущем. И хотя это достаточно проработанный класс приборов силовой электроники, их развитие будет непрерывно продолжаться.

### Быстровосстанавливающиеся диоды

В последние годы замедлился процесс улучшения характеристик быстровосстанавливающихся диодов (на базе кремния). Текущее состояние и возможности быстровосстанавливающихся диодов (БВД) определяют «канавочные» (траншейные — trench) структуры, ячеистые pin-диоды Шоттки, технологии облучения для уменьшения времени жизни и регулирования эффективности эмиттера. Предельное блокирующее напряжение для БВД составляет 6,5 кВ, в ближайшее время ожидается появление БВД на 8 кВ. Быстровосстанавливающиеся диоды, произведенные из других материалов, существуют уже несколько лет. Диоды из арсенида галлия (GaAs) заняли свою специфическую нишу на рынке и будут оставаться там. Силовые диоды из карбида кремния (SiC) толь-

ко выходят на рынок, но могут стать доминирующими для высокочастотных (и высокотемпературных) применений, если будут решены проблемы получения исходного материала. В настоящее время на рынке есть SiC диоды (Шоттки) на напряжения до 1200 В и токи до 20 А. В ближайшее время ожидается промышленное производство SiC-БВД на 2500 В/100 А, а к концу десятилетия — 5 кВ/200 А [6]. К концу десятилетия возможно также появление БВД на основе GaN и алмазных плёнок.

### Тиристоры

Подобно выпрямительным диодам тиристоры являются хорошо отработанными приборами и будут продолжать непрерывно совершенствоваться по пути развития новых технологий внутренних соединений: низкотемпературной пайки, электроактивной пассивации подобной DLC (Diamond-like-Carbon), что позволит поднять рабочую температуру  $T_j$  и повысить термостойкость. Однако определяющее значение тиристоры, доминировавших в 60-80-х годах про-

шлого столетия, будет постепенно уменьшаться. Опотиристоры (LTT), запираемые тиристоры (GTO) и коммутируемые по затвору запираемые тиристоры (GCT, IGCT) являются производными тиристорных технологий и находят применение в мегаваттном диапазоне мощностей. В настоящее время для LTT достигнуты предельные параметры 8 кВ/4 кА, для GCT — 4,5 кВ. К 2006 году планируется производство GCT на 8 кВ, к 2011 году — на 10 кВ. Будет развиваться и совершенствоваться технология IGCT — объединение на одной пластине GCT с обратным диодом в таблеточных корпусах с плавающими прижимными контактами, конструктивно объединённых с платой управления (драйвером). В будущем класс тиристоров все же будет частично заменён и, возможно, полностью вытеснен высоковольтными IGBT. Тиристоры в комбинации с MOSFET-структурами, такие как MCT, MTO и EST, всё же не нашли широкого применения. Их будущее зависит от развития технологий, подобных технологии прямого сращивания пластин (wafer bonding). В настоящее время они нашли частичное применение в схемах с мягкой коммутацией.

### Полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET)

Полевые транзисторы играют важную роль в диапазоне малых и средних мощностей. Сопротивление в открытом состоянии низковольтных MOSFET (до 200 В) было уменьшено за последние годы более чем в 10 раз (каждые два года уменьшение на 50%). Это было достигнуто путём оптимизации

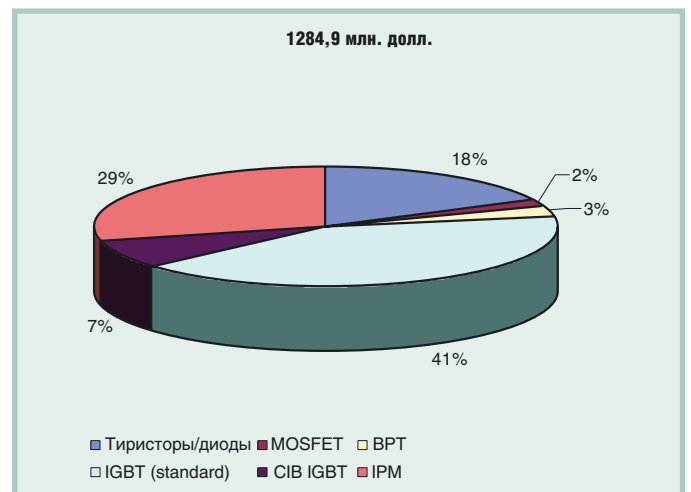
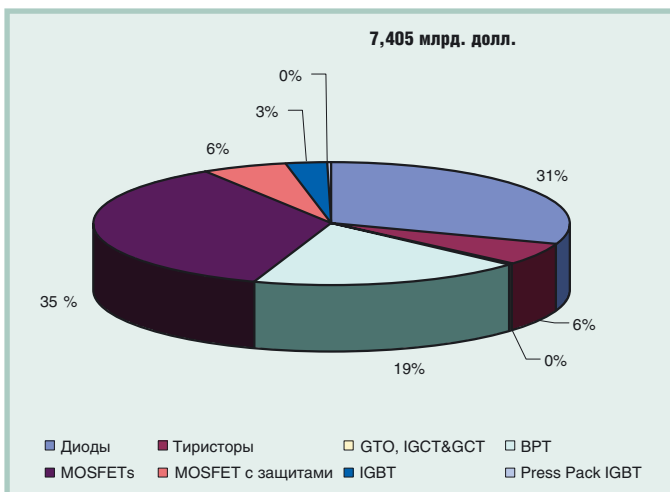


Рис. 3. Структура мирового рынка приборов силовой электроники:

а) дискретные приборы (2003 г.);

б) силовые модули (2003 г.)

геометрии ячейки и использования технологии утопленного канала (trench-gate technology). Плотность упаковки современных низковольтных MOSFET достигает в настоящее время 100 млн. элементарных ячеек на квадратный дюйм. Для низковольтного диапазона напряжений можно предсказать непрерывное развитие MOSFET для снижения статических потерь и повышения стойкости.

Для высоковольтных MOSFET реальной революцией была технология создания суперперехода, реализованная Infineon Technology в семействе высоковольтных MOSFET-CoolMOS™. Поэтому высоковольтные MOSFET будут иметь все большее и большее значение в диапазоне напряжений от 500 до 1200 В.

В течение ближайших пяти лет на рынке могут появиться полевые транзисторы, управляемые рп-переходом (VJFET) на базе карбида кремния (SiC). Также имеется потенциал для использования в качестве быстрых и стойких высоковольтных ключей каскодных соединений SiC — MOSFET с низковольтными кремниевыми MOSFET [7].

## БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Биполярные Дарлингтон-транзисторы, достигшие предельных параметров 1400 В/200 А (на чип) и широко применявшиеся в последние два десятилетия прошлого столетия, будут постепенно вытесняться и заменяться биполярными транзисторами с изолированным затвором (IGBT).

IGBT будут оставаться «рабочей лошадкой» силовой электроники как минимум в течение следующего десятилетия. Блокирующее напряжение — сейчас до 6500 В — увеличится до 8000 В. Технология утопленного канала (trench-gate), развитая в настоящее время для IGBT на 600 и 1200 В, распространится на все классы напряжений: 3300 В к 2006 году; 8 кВ — к концу десятилетия. Уменьшение потерь достигается путём использования буферных слоёв и тонких пластин. В настоящее время ещё не ясно, сможет ли технология суперпереходов улучшить характеристики IGBT без увеличения стоимости.

На рынке появились первые IGBT с обратной блокирующей способностью. Их уникальные коммутационные характеристики могут быть определяющими для некоторых применений.

Для маломощных и высоковольтных (1200 В) применений, включая силовые интегральные схемы, будут совершенствоваться «горизонтальные» (lateral) IGBT, предельные коммутационные характеристики которых обеспечат коммутацию 1200 В/5 А к 2006 году и 10 А/1200 В — к концу десятилетия. Для мощных применений разработана модификация IGBT — биполярный транзистор с изолированным затвором с увеличенной инжекцией (IEGT — Injection Enhanced Gate Transistor), который объединяет преимущества IGBT по малой мощности управления, малым коммутационным потерям и широкой области безопасной работы (недостаток — высокое прямое падение напряжения из-за малой инжекции зарядов из эмиттера) с преимуществами GTO по низкому прямому падению напряжения (высокая инжекция зарядов из анода и катода) [8]. Фирма Toshiba Semiconductor производит в пластмассовых корпусах 140×190 мм с AlSiC-основанием 6 типов модулей: 1200 А/1700 В; 400, 800 и 1200 А/3300 В; 600 А/6500 В — и 5 типов в герметичных металлокерамических корпусах прижимной конструкции:

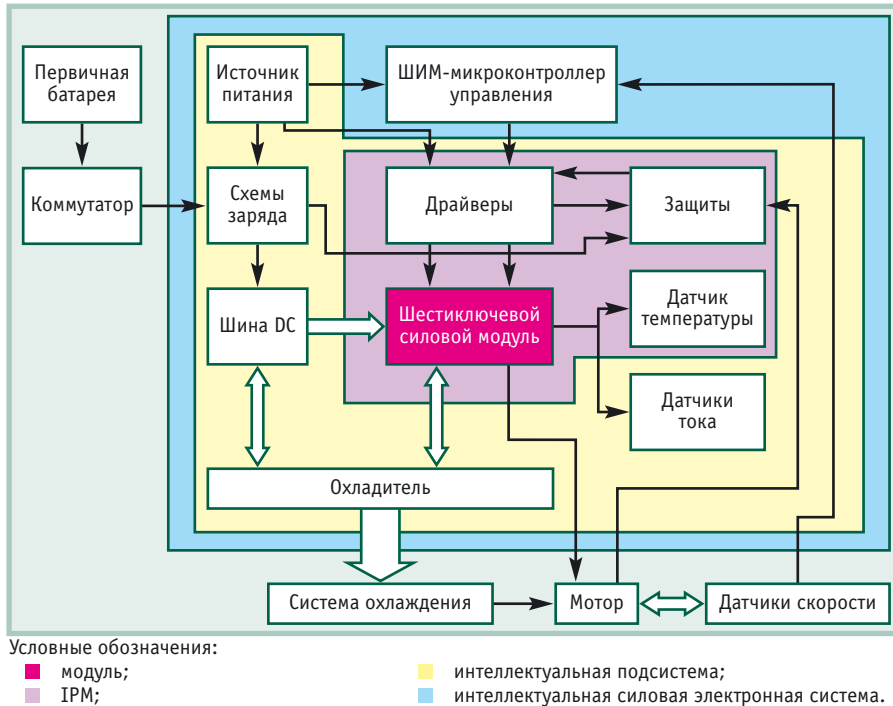


Рис. 4. Уровни гибридной системной интеграции

1000 А/2500 В (Ø75 мм); 1200 А/3300 В (Ø85 мм); 1200 А (Ø85 мм), 1500 А, 2100 А (Ø125 мм)/ 4500 В [8]. IEGT-модули прижимной конструкции предназначены для применения в энергетике (высоковольтные линии передачи постоянного тока, статические компенсаторы реактивной мощности), сверхмощных промышленных электроприводах, а также для высокоскоростного электрифицированного транспорта. IEGT-модули паяной конструкции рекомендуются для применения в промышленных электроприводах.

### Пути развития приборов силовой электроники

Совершенствование новых поколений силовых полупроводниковых приборов (в основном классов MOSFET и IGBT) будет основываться на следующих возможных **ключевых технологиях**:

- технология тонких пластин (thin wafer technology); в настоящее время для приборов силовой электроники до 1200 В уже применяются кремниевые пластины диаметром 150 мм (включая и эпитаксиальные) толщиной 100 мкм. К 2006 году станет возможным использование 150 мм пластин толщиной 60 мкм, а к концу десятилетия — пластин диаметром 200 мм с такими толщинами;
- технология суперпереходов; в настоящее время для создания высококачественных переходов широко ис-

пользуются технологии ионной имплантации, утопленных каналов (trench-gate) и т.п. В последующие годы они будут совершенствоваться с целью сокращения стоимости конечных приборов;

- технология кремния на изоляторе (SOI) предназначена в основном для диапазона малых мощностей, для создания силовых интегральных схем, включая интеллектуальные и высоковольтные. Основная проблема — снижение стоимости;
- применение новых полупроводниковых материалов; к концу десятилетия возможно промышленное применение кремниевых пластин диаметром до 200 мм, полученных методом бесстигельной зонной плавки. Проблемы использования карбида кремния для приборов силовой электроники будут описаны далее.

Появления первых приборов силовой электроники на основе GaN или алмазных пленок следует ожидать не ранее конца текущего десятилетия.

Основная идея развития приборов силовой электроники заключается в переходе от использования **дискретных компонентов к силовым электронным системам**.

К современному и перспективному преобразовательному оборудованию практически все области применения предъявляют требования:

- снижения стоимости;
- увеличения надёжности;

- уменьшения размеров и веса;
- создания конструкций и функциональных возможностей, обеспечивающих легкое использование в различных применениях;
- быстрого выхода на рынок.

Кардинальным решением для обеспечения этих требований является системная интеграция — объединение в едином конструктиве, подсистеме или всей системе функций силовой и информационной электроники, датчиков, электрических аппаратов и т.п. Системная интеграция развивается в двух направлениях — монолитном и гибридном.

Монолитная интеграция объединяет на одном кристалле силовые ключи, драйверы и схемы диагностики и защиты. В настоящее время реализована для блокирующих напряжений до 500 В и токов до 5 А. Этот диапазон мощностей будет расширяться медленно. Причина заключается в том, что неэкономично получать мощные высоковольтные и сильноточные ключи в едином технологическом процессе с созданием низковольтных цифровых и аналоговых элементов управляющей части монолитного прибора.

Гибридная интеграция получила большее развитие и имеет 4 уровня:

- 1) модуль;
- 2) интеллектуальный модуль (IPM);
- 3) интеллектуальная подсистема;
- 4) интеллектуальная силовая электронная система.

На рис. 4 показаны уровни гибридной системной интеграции на примере электропривода автомобиля:

- 1) силовой шестиключевой модуль (трёхфазный мост);
- 2) интеллектуальный силовой модуль (IPM), объединяющий силовую часть (шестиключевой модуль) со схемами управления (драйверы), защитами и датчиками (например, температуры);
- 3) интеллектуальная подсистема, объединяющая IPM с охладителем, шиной постоянного тока с конденсатором, датчиками тока, источником питания для собственных нужд;
- 4) интеллектуальная силовая электронная система, в которой к интеллектуальной подсистеме добавлены микропроцессорный контроллер управления и регулирования электропривода. Внешними для такой системы являются только первичный источник и исполнительный механизм (электродвигатель с датчиком скорости или без него).

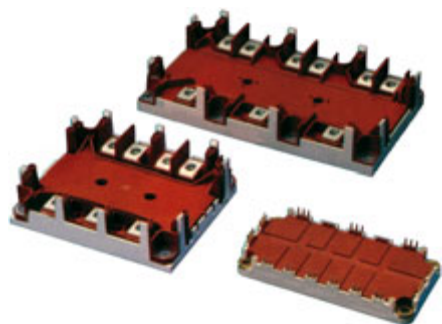


Рис. 5. Примеры конструкций многоключевых модулей

Примерами системной интеграции 1-го уровня являются многочисленная серия одно- и двухключевых модулей с изолированным медным или AlSiC-основанием на максимальные параметры 1200 А/3300 В — 3600 А/1200 В, напряжением изоляции до 9,6 кВ, размерами до 150×250 мм<sup>2</sup>; шестиключевых IGBT-модулей (EcoPak, LoPak3, 4, 5 и SKiM4, 5) с изолированным медным основанием или без него (с непосредственным прижимом Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> или ALN DCB-керамики на охладитель) на токи до 300 А на ключ и напряжения 600, 1200 и 1700 В; серия модулей PIM на токи от 10 до 100 А и напряжения 600 и 1200 В, содержащих мостовые

диодные выпрямители и IGBT трёхфазные мосты.

На рис. 5 справа внизу приведён пример современной конструкции многоключевого модуля, имеющего стандартные габаритно-присоединительные размеры (EcoPak, LoPak3) и максимально гибкие возможности внутренней схемотехники.

Примерами интеграции 2-го уровня могут служить IPM, производимые фирмами Mitsubishi, Fuji, Hitachi, в которых наряду с мостовым трехфазным инвертором могут содержаться транзистор и диод схемы торможения, а также схемы управления и защит. Более подробные сведения об этом классе приборов силовой электроники изложены в разделе «Интеллектуальные силовые IGBT-модули».

Примером интеграции 3-го уровня может служить серия интегральных интеллектуальных силовых подсистем SKiiP (рис. 6), производимая фирмой Semikron для напряжений 600, 1200 и 1700 В и токов до 2400 А на ключ. Серия включает двух-, четырёх-, шести-ключевые схемы (плюс чоппер), имеет встроенные драйверы, датчики напряжения и схемы защиты от перенапря-



Рис. 6. Интегральная интеллектуальная силовая подсистема SKiiP

жений на шине постоянного тока, смонтированы на охладитель с воздушным или жидкостным охлаждением, имеют гальваническую трансформаторную или оптоволоконную развязку.

Важной проблемой при системной интеграции является стандартизация силовых систем на каждом уровне, сопряжение сигналов управления и датчиков (интерфейса). Так, на уровне силовых модулей признанными международными стандартами являются корпуса, габаритно-присоединительные размеры и схемотехника многоключевых модулей EcoPak (LoPak3) — Eupec, Semikron, Ixys,

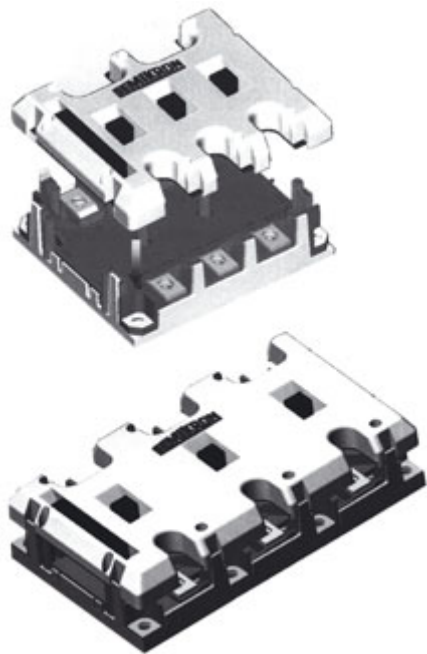


Рис. 7. Модули серий SKiM 4/5

Powerex и др., LoPak4 и LoPak5 фирмы ABB Semiconductors или SKiM4 и SKiM5 фирмы Semikron (рис. 5).

А использование многоключевых модулей серии SKiM или LoPak вместе с драйверами в едином конструктиве превращает их по существу в интеллектуальный силовой модуль (IPM — Intelligent Power Module) второго уровня интеграции (рис. 7). В схемах драйверов также стандартными являются уровни входных управляющих сигналов, степень гальванической развязки, ряды импульсных выходных токов для управления IGBT, уровни сигналов датчиков (температуры, напряжения, тока), перечень функций защиты (от перегрузки по току, включая к.з. в реальном времени, перенапряжений, перегрева, неключевого режима работы транзистора, отказа в источнике питания для собственных нужд драйвера).

Модули серии Eсоpо широко применяются разработчиками в преобразователях частоты электроприводов переменного тока мощностью в десятки кВт.

Модули LoPak4 (рис. 5 внизу справа) и LoPak5 (рис. 5 сверху) имеют предельные характеристики:  $6 \times 300$  А/1200 В и  $6 \times 225$  А/1700 В в шестиключевом исполнении и  $2 \times 675$  А/1700 В и  $2 \times 900$  А/1200 В в двухключевом (полумостовом) исполнении. Они выпускаются в двух вариантах: с медным основанием и без основания с прямым контактом DCB-керамики модуля на охладитель (Semikron). Модули имеют низкую паразитную индуктивность как внутренних выводов, так и внеш-

них шин в шестиключевом и двухключевом применениях. Внешние силовые шины устанавливаются на болты силового модуля и прикручиваются гайками. Управляющие контакты соединяются пружинными контактами с печатной платой драйвера, конструктивно и схематически сопряженной с силовым модулем и легко устанавливаемой над модулем на стойки с защёлками. На рис. 7 показаны модули серий SKiM 4/5 с драйверами серий SKNI 64/5.

Легкое запараллеливание ключей в модуле и модулей в целом позволяет использовать всего три типа модулей серии LoPak для инверторов мощностью от 50 кВт·А до 1 МВ·А.

### ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИЛОВЫЕ IGBT-МОДУЛИ

Самым большим рынком для приборов силовой электроники является электропривод. На рис. 8 приведена классическая функциональная схема преобразователя частоты со звеном постоянного тока. Входное напряжение поступает на мостовой диодный выпрямитель (1), вход которого защищён ограничителями перенапряжений (8). К выходу выпрямителя подключаются фильтровая ёмкость шины постоянного тока со схемой «мягкого» заряда (9) и мостовой инвертор напряжения на IGBT (4), к выходу которого подключается нагрузка — двигатель переменного тока (6). В приводах малой и средней мощности к шине постоянного тока подключается схема торможения (5) и левая часть (4). Силовая часть преоб-

разователя содержит также датчики тока (2) и температуры (3). Схема управления содержит драйверы (12) для управления транзисторами инвертора и тормоза со схемами защит (10, 13), контроллер управления (14) и источники питания для собственных нужд (11). Так как силовая схема и часть системы управления (драйверы, датчики, схемы диагностики и защит) являются одинаковыми для большинства применений, естественным было желание объединить эти элементы в единый конструктив — интеллектуальный силовой модуль. Появление МОП-управляемых приборов, требующих малых мощностей управления, а также высокая стойкость IGBT к перегрузкам и лёгкость управления ими в аварийных режимах позволили объединить в едином корпусе и силовую часть преобразователя (4), и/без (1), и схемы драйверов, диагностики и защит (10), (12), (13) из рис. 8.

Силовая часть интеллектуального модуля изготавливается, как и стандартные модули паяной конструкции, с изолированным основанием. Здесь также используются описанные технологические приёмы, позволяющие повысить надёжность и термоциклическую устойчивость модулей, снизить паразитные индуктивности выводов. Интеллектуальная часть модуля размещается на «втором этаже», на многослойной печатной плате, установленной над DCB-платами с силовыми полупроводниковыми чипами (рис. 9).

По такой технологии фирмами Fuji, Mitsubishi, Toshiba выпускается целая

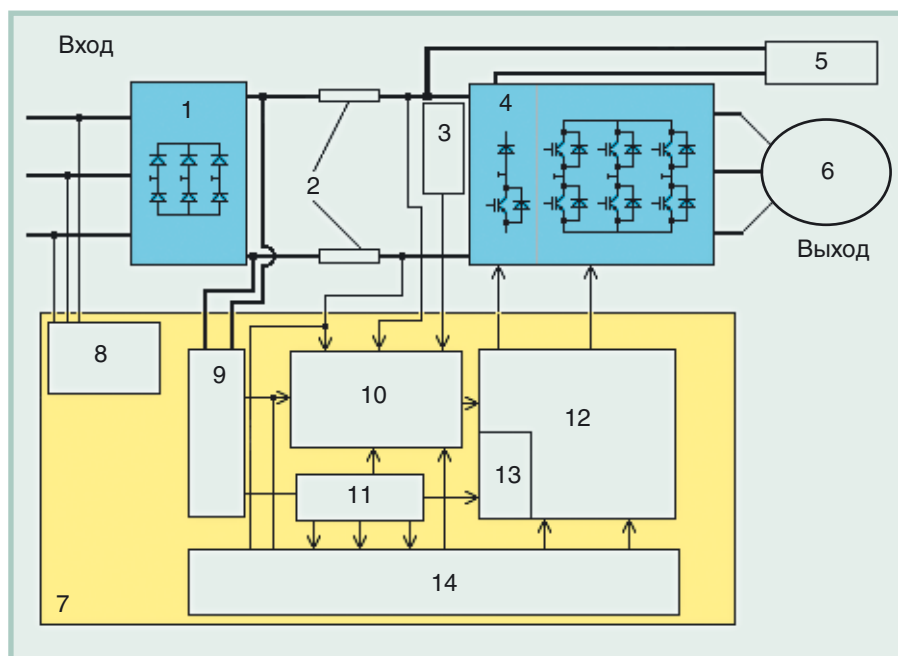


Рис. 8. Функциональная схема преобразователя частоты электропривода

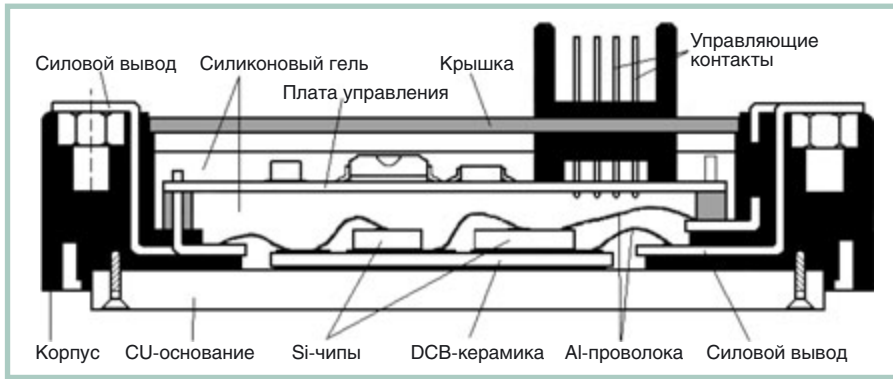


Рис. 9. Разрез силового интеллектуального модуля

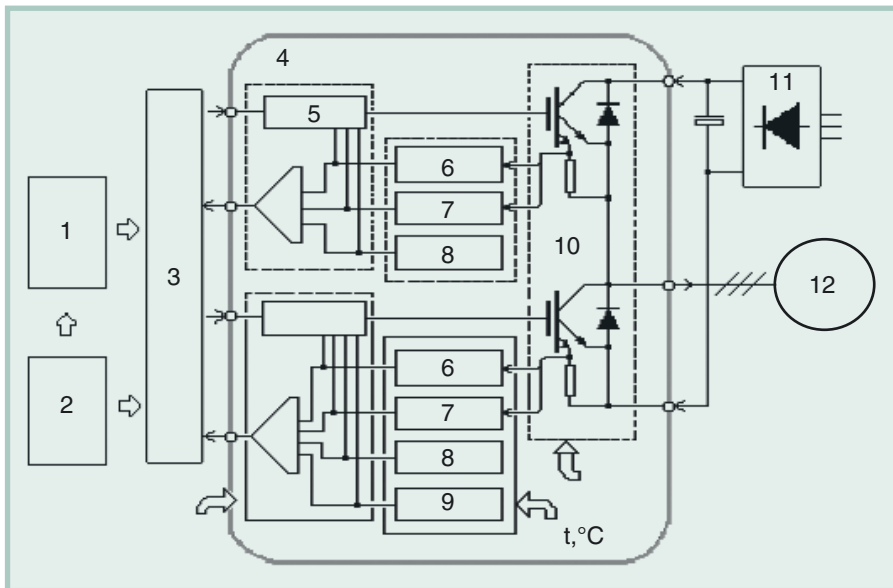


Рис. 10. Функциональная схема интеллектуального модуля

гамма интеллектуальных силовых модулей (IPM) на 300 А/1200 В в двухключевом исполнении и 100 А/1200 В (одного ключа) в шести- и семиключевом исполнении. Функциональная схема таких модулей приведена на рис. 10. В качестве схем драйверов применяются высоковольтные силовые интегральные схемы, обеспечивающие, кроме формирования импульсов управления на затворы IGBT (5), также функции защиты силовых ключей от перегрузок по току (OC — Over Current) — (6), включая короткое замыкание (SC — Short Current) — (7), защиту от перегрева (OT — Over Temperature) — (9), от аварии (недопустимого понижения) напряжения питания драйверов (UV — Under Voltage) — (8). В отдельных IPM добавлены гальваническая развязка управляющих сигналов (3), источники питания драйверов (2). В следующих поколениях планируется включать в состав IPM также и контроллер управления (1). Внешними для IPM являются шина постоянного тока

(выпрямитель 11) и нагрузка (двигатель 12).

**Технологии корпусирования силовых приборов** являются такой же важной проблемой, как и создание чипов. Без корпусирования невозможно подключить силовой полупроводниковый прибор к источнику энергии и к нагрузке, невозможно подать сигнал управления и отвести выделяющееся тепло (напомним, что с поверхности полупроводникового кристалла необходимо отводить тепло, в 10-40 раз большее, чем выделяет кухонная электропечь на максимальной мощности нагрева). Кроме того, надёжность работы прибора зависит от качества и технологий корпусирования полупроводниковых чипов. Поэтому и в настоящее время, и в будущем разработка и применение новых материалов и технологий корпусирования будут определять развитие приборов силовой электроники [9].

В первые годы создания этих приборов использовалось огромное разнообразие материалов, спаянных или сва-

ренных вместе, несмотря на различие в коэффициентах теплового расширения (КТР), что не могло обеспечить высокую надёжность и термоциклоустойчивость полупроводниковых приборов паяной конструкции и конструкции с ультразвуковой разваркой Al-проволокой силовых и управляющих контактов на Si-чип. В современных приборах силовой электроники эти недостатки устранены за счёт применения новых технологий соединения материалов, имеющих такой же, как у кремния, КТР:

- матричный композиционный материал AlSiC (вместо меди или алюминия);
- $Al_2O_3$  или AlN DCB-керамика (Direct Copper Bonding) или AMB-керамика (Active Metal Brazing);
- технология прижимного контакта металлизированной керамики непосредственно на охладитель (исключение паяного слоя), реализованная фирмой Semikron в SKiiP- и SKiM-технологиях;
- исключение паяных и сварных соединений в модулях прижимной конструкции (Press Pack Technology — рис. 11), обеспечивающих наивысшую надёжность и практически неограниченную энерготермоциклоустойчивость.

Наряду с применением перечисленных материалов (AlSiC, DCB  $Al_2O_3$ -или AlN-керамика) проводятся исследования по использованию других материалов для улучшения тепловых и механических характеристик (нитрид кремния  $Si_3N_4$ , графит, алмаз) и технологий соединения: замена паяных соединений на непаяные, низкотемпературная пайка на основе серебра — NTV (Niedertemperaturverbindungstechnik), способная заменить все соединения в силовых модулях.

Важную роль при создании высокоинтегрированных силовых полупроводниковых приборов играет использование современных мощных систем автоматизированного моделирования/проектирования (CAD/CAM), обеспечивающих трёхмерное (3D) моделирование и проектирование приборов, моделирование схем, включая коммутационные процессы с учётом паразитных элементов, 3D-моделирование механических и тепловых характеристик, 3D автоматизированное проектирование конструкции, включая размещение элементов и трассировку проводников, получение рабочей ин-

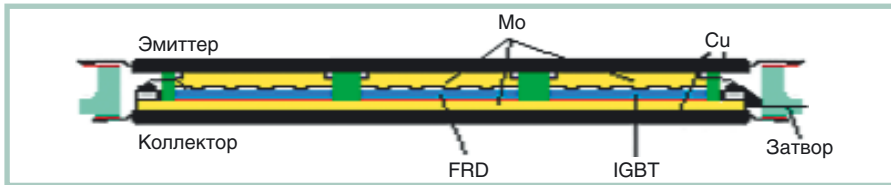


Рис. 11. Структура силового модуля прижимной конструкции

формации для производственно-технологического оборудования (фотошаблоны, чертежи деталей и оснастки и т.п.), моделирование и оценку надёжности.

На сегодня алюминий является самым распространенным материалом, используемым для **отвода тепла** (охладитель). Для специальных применений с очень большими тепловыми потоками используются и будут использоваться медные охладители и тепловые трубы. В течение ближайших десяти лет ожидается создание новых материалов для охладителей с высокой теплопроводностью, имеющих КТР, одинаковый с КТР изолирующей подложки или основания силового прибора, дешёвых в производстве. Методы эффективного отвода тепла, хорошо известные сегодня, но не получившие большого распространения, например

охлаждение напылением и распылением, в будущем могут найти широкое применение. Однако самый большой вклад (более 50%) в общее тепловое сопротивление между чипом и охлаждающей средой вносят теплопроводящие пасты. Необходимо как минимум в 10 раз увеличить теплопроводности паст для таких применений, однако пока неизвестно как. Другой путь для повышения эффективности охлаждения — отказ от теплопроводящих паст и использование прямого паяного соединения изолирующей AlN DCB-подложки с охладителем из AlSiC.

В специальных областях применения силовой электроники: нефтедобывающее оборудование, энергетика, автомобильная электроника, аэрокосмические и военные применения — в ближайшие годы следует ожидать применения приборов на основе полупро-

водниковых материалов с большой шириной запрещённой зоны, в первую очередь из **карбида кремния (SiC)**.

SiC обладает великолепным сочетанием свойств для применения в приборах силовой электроники:

- работа при высоких (до 600–700°C) температурах (ширина запрещённой зоны для SiC составляет 2,4–3,3 эВ, для Si — 2,4 эВ);
- высокая теплопроводность: 3–5 Вт/(см град) для SiC по сравнению с 1,5 Вт/(см град) для Si;
- большие плотности рабочих токов (1000 А/см<sup>2</sup>).

Хорошая подвижность электронов (1000 см<sup>2</sup>/V<sub>s</sub> для SiC по сравнению с 1400 см<sup>2</sup>/V<sub>s</sub> для Si, где V<sub>s</sub> — величина поверхностного потенциала) в сочетании с высокой возможной концентрацией (на два порядка по сравнению с кремнием: 1,56·10<sup>16</sup> по сравнению с 1,57·10<sup>14</sup> см<sup>-3</sup>), а следовательно, и большая (на порядок) критическая напряжённость электрического поля (3–5·10<sup>6</sup> В/см для SiC по сравнению с 2–5·10<sup>5</sup> В/см) позволяют, в принципе, улучшить все характеристики приборов силовой электроники: быстродействие, предельные коммутируемые то-



ки и напряжения, статические и динамические потери. Применение приборов силовой электроники на основе SiC позволит радикально уменьшить габариты и массу преобразовательного оборудования, увеличить надёжность работы за счет возможности работы на более высоких частотах преобразования, с более высокой температурой перехода и упрощённой системой охлаждения.

Однако основными препятствиями на пути широкого внедрения приборов силовой электроники на основе SiC являются получение высококачественного исходного материала и эпитаксиальных пленок (проблема микропор — micropores), их высокая стоимость, сложность и дороговизна технологических процессов осаждения CVD (Chemical Vapor Deposition), ионной имплантации, плазмохимии и т.п. Современный уровень разработок и производства позволяет получать исходный 4H-SiC в пластинах диаметром до 3 дюймов с плотностью дефектов до  $5 \text{ см}^{-2}$ . Для увеличения процента выхода годных SiC-приборов силовой электроники этот показатель должен быть уменьшен минимум в пять раз,

так как сегодняшний уровень качества исходных SiC-пластин позволяет производить приборы площадью не более нескольких  $\text{мм}^2$ .

Интенсивные разработки последнего десятилетия прошлого века уже позволили начать промышленное производство SiC-диодов Шоттки на токи до 25 А и напряжения до 1200 В, экспериментально отработать конструкции и технологии производства сверхвысоковольтных диодов, высоковольтных полевых транзисторов (с изолированным затвором SiC-MOSFET и управляемых рп-переходом SiC-JFET), каскодных SiC-Si-ключей. В ближайшие годы следует ожидать появления на рынке следующих типов SiC-приборов силовой электроники [6, 7]:

- быстродействующие диоды (Шоттки) с блокирующим напряжением 4,9 кВ;
- MOSFET с коммутируемыми напряжениями более 1000 В и сопротивлением в открытом состоянии, на три порядка меньшим по сравнению с MOSFET на базе Si;
- JFET (полевой транзистор, управляемый рп-переходом) с блокирующими напряжениями 3,5 кВ с удель-

ным сопротивлением в открытом состоянии  $25 \text{ мОм см}^2$  (как у 600 В CoolMOS), что соответствует плотностям коммутируемых токов  $100 \text{ А/см}^2$  и прямым падениям напряжения около 2,5 В (для 3300 В приборов);

- каскодных SiC-Si-приборов;
- высоковольтных быстродействующих биполярных силовых приборов (диодов, транзисторов, тиристоров) с коммутируемыми напряжениями более 10 кВ (19 кВ!) и частотами коммутации несколько кГц.

### **Состояние российских разработок и производства**

Состояние российской силовой электроники можно охарактеризовать как «отстали навсегда». В стране отсутствует научный, инженерно-технический и производственно-технологический потенциал для создания современных и перспективных конкурентоспособных приборов силовой электроники, отсутствует чёткая государственная политика развития этой отрасли. Российский рынок современных приборов силовой электроники более чем

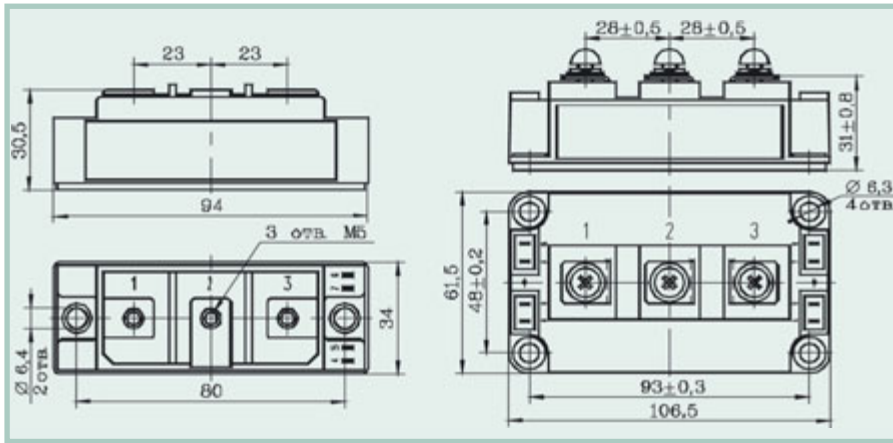


Рис. 12. Чертёж силовых IGBT-модулей паяной конструкции стандарта 34 и 62 мм

на 95% занят ведущими мировыми производителями: Infineon Technology (Eupec), Semikron, ABB Semiconductors, International Rectifier, Mitsubishi Electric, Toshiba Semiconductors, Hitachi, Fuji. Такая же картина с современными активными (микроэлектронными) и пассивными элементами для устройств силовой электроники. Не лучше ситуация и на рынке конечных устройств силовой электроники, особенно на рынке промышленных приводов переменного тока.

Отечественная промышленность в настоящее время выпускает только номенклатуру традиционных приборов силовой электроники — диодов, тиристоров, биполярных транзисторов. В последние годы было освоено производство запираемых тиристоров (ОАО «Электровыпрямитель», г. Саранск и ЗАО «Протон-Электротекс», г. Орел) и силовых полевых транзисторов с изолированным затвором (ОАО «ВЗПП», г. Воронеж, з-д «Транзистор», г. Минск). На ОАО «Электровыпрямитель» ведутся работы по созданию GCT (IGCT), освоено производство силовых IGBT-модулей паяной конструкции (рис. 12) по лицензии НПП «ИНЭЛС» (г. Москва) с использованием импортных кристаллов IGBT и FRD производства фирм Infineon Technology (Siemens) или ABB Semiconductors.

В рамках Федеральной целевой программы «Национальная технологическая база» ведутся работы по созданию IGBT и FRD на токи 50, 75 и 100 А (на кристалл) и напряжения 1200, 1700, 2500 и 3300 В (ЗАО «Группа-Кремний», г. Брянск), работы по созданию многоключевых универсальных IGBT-модулей на токи до 900 А и напряжения 1200 и 1700 В (ОАО «Контур», г. Чебоксары) и модулей прижимной конструк-

ции на токи до 1400 А и напряжения 1800, 2500, 3300 и 5200 В (ОАО «Электровыпрямитель», г. Саранск). Новое поколение многоключевых универсальных силовых IGBT-модулей предполагает 8 типов шестиключевых модулей в трёх типах корпусов (аналогичных серии LoPak — рис. 5), заявленных как стандарт 21 века на токи 75, 100, 150, 200 и 300 А (на ключ) и напряжения 1200 и 1700 В.

Серию силовых IGBT-модулей для транспортных применений на токи до 2400 А и напряжения 1200, 1700 и 3300 В в пластмассовых корпусах E1 и E2 с медным и AlSiC-основаниями, с использованием чипов Infineon Technologies освоил ОАО «Электровыпрямитель».

В НПП «ИНЭЛС» заканчивается разработка серии одноключевых силовых IGBT-модулей для специальных применений в герметичных корпусах с изолированным основанием, с металлостеклянными силовыми и управляющими вводами по технологии паяных соединений на металлизированную  $Al_2O_3$ - или AlN-керамику. Внешние габаритно-присоединительные размеры этих модулей соответствуют стандартным (62 мм) негерметичным корпусам двухключевых модулей, производство которых уже освоено (рис. 12). Опытные образцы таких модулей (200, 300, 400 А; 1200 В) успешно прошли все электрические, механические и климатические испытания. Серийное производство этих модулей с приемкой заказчика планируется с 2004 г.

Ведутся работы по созданию серии двухключевых силовых IGBT-модулей (50, 75, 100, 150 и 200 А; 1200 и 1700 В) со стандартными габаритно-присоединительными размерами (34 и 62 мм), а также серии многоключевых и «интел-

лектуальных» модулей для специальных применений в герметичных корпусах с габаритно-присоединительными размерами, подобными общепромышленным модулям серии LoPak3, 4, 5.

## Выводы

В ближайшие 10 лет не ожидается появления новых типов приборов силовой электроники, которые бы заняли доминирующее положение на рынке. Будут преобладать в области низких напряжений — полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET), в области высоких напряжений — биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) в своих улучшенных модификациях.

Будущие технологии корпусирования должны обеспечить большую степень интеграции и более широкий диапазон рабочих температур. Основная идея интеграции: от дискретных приборов и модулей к интеллектуальным модулям, затем к интеллектуальным подсистемам и, наконец, к силовым интеллектуальным электронным системам. Предельные характеристики приборов с монолитной интеграцией будут повышаться незначительно, доминировать будет гибридная интеграция. Силовые модули и дискретные приборы не будут замещать друг друга. В области малых мощностей преимущественно будут использоваться дискретные приборы (монолитная интеграция), имеющие преимущества перед модулями по стоимости (минимальный объём операций сборки, высокий процент выхода годных, большие объёмы автоматизированного производства). В области больших мощностей силовые модули, обеспечивающие требуемые уровни мощности и надёжности, будут иметь преимущества перед дискретными приборами.

Технология прижимных контактов (Press Pack Technology) является наиболее перспективным решением по обеспечению высоких требований по компактности, надёжности и термоциклоустойчивости для применений в автомобильном, городском, железнодорожном и водном электрифицированном транспорте.

В области низких напряжений из-за очень высокой плотности мощности (trench-gate technology) и в дискретных приборах, и в силовых модулях придётся отказаться от проволочных сварных соединений, должны появиться новые технологии соединений.

Должна быть решена важнейшая задача стандартизации и унификации. Однако вероятно, что и модули, и дискретные приборы не будут стандартизованы. Первый производитель, предложивший привлекательный для рынка продукт, установит стандарт де-факто. Остальные производители будут следовать ему (или предложат что-то лучшее).

Большее значение при создании приборов и устройств силовой электроники приобретут мощные системы автоматизированного проектирования.

Разработки и применение новых материалов позволят улучшить характеристики и приборов силовой электроники, и пассивных элементов.

Выход на широкий рынок приборов силовой электроники на основе новых материалов будет осуществляться постепенно, небольшими шагами.

Главной движущей силой развития силовой электроники является и будет являться снижение цены, габаритов и повышение надёжности.

Хочу присоединиться к мнению одного из корифеев силовой электроники профессора Боуза (Bose) о том, что двумя самыми важными технология-

ми сверхавтоматизированного 21 века будут компьютеры — «разум» — и силовая электроника — «мускулы». Однако из этих двух ключевых технологий Россия уже упустила первую и в ближайшие годы рискует потерять и вторую. ●

### ЛИТЕРАТУРА

1. С.Н. Флоренцев. Состояние и перспективы развития приборов силовой электроники на рубеже столетий. Анализ рынка// Электротехника. — 1999. — № 4. — С. 2-10.
2. С.Н. Флоренцев. Силовые IGBT-модули — основа современного преобразовательного оборудования// Электронные компоненты. — 2002. — № 6. — С. 11-17.
3. С.Н. Флоренцев. Силовая электроника начала тысячелетия// Электротехника. — 2003 г. — № 6. — С. 3-9.
4. А.Н. Думаневич, В.А. Потапчук, Н.И. Якивчик. Основная элементная база преобразовательной техники// Сборник докладов VII Симпозиума «Электротехника 2010 год. Перспективные виды электро-технического оборудования для передачи и распределения электроэнергии». Московская обл. Май 27-29, 2003. Том. 4. С. 134-144.
5. С.Н. Флоренцев. Современные и перспективные силовые MOSFET и IGBT-модули// Там же. С. 5-14.
6. J.A.Ferreira, J. Popovic. Packaging, integration, thermal management — from the state of the art to future trends//Proceedings PCIM'2003. Nuremberg, Germany. May 20-22, 2003. P. 11-20.
7. T. Reimann, A. Mueller, J. Petzoldt, I. Zverev, P. Friedrichs. SIC-JFET-Cascode: State-of-the-Art, Performance and Application// Proceedings PCIM'2003. Nuremberg, Germany. May 20-22, 2003. P. 257-262.
8. N. Yamano, N. Tsukamoto, H. Matsumura, G. Tchouangue. TOSHIBA's newest 3.3kV 1.2kA IEGT module and remarkable improvements in 4.5kV IEGT performance// Proceedings PCIM'2003. Nuremberg, Germany. May 20-22, 2003. P. 357-362.
9. T. Stockmeier. Power Semiconductor Packaging — A Problem or a Resource? From the State of the Art to Future Trends// Proceedings PCIM'2000. Nuremberg, 2000, Germany. P. 195.

**Автор — генеральный директор  
НПП «ИНЭЛС»  
Телефон: (095) 366-0711**