

MiniSKiiP® IPM — НОВАЯ АРХИТЕКТУРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

АНДРЕЙ КОЛПАКОВ, инженер по применению, Andrey.Kolpakov@semikron.com

Широкое внедрение новых технологий IGBT позволяет решить основную задачу современного рынка силовой электроники — повышение эффективности преобразования энергии. Решение этой проблемы во многом облегчается при использовании интеллектуальных силовых модулей (IPM). В предлагаемой статье рассказывается о новом миниатюрном IPM [1, 2], предназначенном для построения промышленных приводов мощностью до 15 кВт. Уникальным узлом модулей серии MiniIPM является интегральный драйвер, разработанный с применением технологии SOI (Silicon On Insulator), позволяющей подавить эффект защелкивания и резко повысить устойчивость схемы к наведенным перенапряжениям обеих полярностей.

На рынке маломощных применений, к которым относятся приводы с моторной мощностью до 2 кВт, популярность интегральных силовых модулей, вытесняющих схемы на дискретных компонентах, растет лавинообразно. В отношении подобных устройств термин IPM в большинстве случаев означает трехфазный инвертор MOSFET/IGBT с интегральным драйвером. Как правило, в таких модулях чипы припаиваются к несущей рамке с выводами, устанавливаемой в штампованный пластиковый корпус.

В свою очередь, интеллектуальные силовые модули высокой мощности строятся на базе конструктивов, содержащих керамическую изолирующую плату с чипами IGBT и диодов и отдельную печатную плату схемы управления. К недостаткам подобных компонентов можно отнести сложные промежуточные соединения и невозможность эффективного отвода тепла, рассеиваемого элементами драйвера. Оба названных решения плохо подходят для реализации IPM среднего диапазона мощности (3...20 кВт) из-за низкой теплопроводности материалов корпусов в первом случае и трудности интеграции платы управления в малогабаритном конструктиве во втором.

Как правило, специализированные приводные модули имеют конфигурацию CIB (Converter — Inverter — Brake); они объединяют в одном корпусе элементы выпрямителя, инвертора IGBT и тормозного каскада, необходимые для построения стандартного привода электромотора. Миниатюрные силовые ключи MiniSKiiP, разработанные компанией SEMIKRON и предназначенные для построения приводов мощностью до 30 кВт, выпускаются в версиях CIB и AC (трехфазный инвертор).

Высокой популярности данных компонентов способствует применение пружинных сигнальных выводов вместо традиционных паяных контактов, что упрощает монтаж модулей и их замену в случае необходимости. Специальные испытания данного типа соединений показали их высокую устойчивость к микровибрациям и фреттингу, а также долговременную стабильность контактных свойств в условиях достаточно мощных применений [4].

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИЖИМНОГО КОНТАКТА

В основе конструкции выпускаемых в настоящее время стандартных силовых ключей лежит медная базовая плата толщиной 2...3 мм, на которой размещается изолирующая керамическая DBC-пластина с чипами IGBT и диодов. База, с помощью которой производится крепление модуля на радиатор и осуществляется отвод тепла, является в то же время элементом конструкции, ограничивающим срок службы компонента. При изменении температуры силового ключа в сопрягающихся слоях возникают термомеханические напряжения, вызванные разницей коэффициентов теплового расширения КТР (или CTE — Coefficient of Thermal Expansion). Вероятность разрушения слоя оценивается с помощью т.н. фактора риска, являющегося произведением разницы КТР на площадь контакта. Самым проблемным является соединение базовой платы и DBC-керамики, имеющее наибольшую площадь. Тепловые стрессы вызывают изгиб элементов конструкции (т.н. биметаллический эффект) и приводят к постепенному разрушению связей.

Эти напряжения создаются и при производстве модулей в процессе пайки керамики на базу. Для их компенсации

используется технологический предварительный изгиб медной пластины. Правильно выбранное усилие и радиус изгиба позволяют обеспечить хорошую результирующую плоскостность основания модуля и избежать образования полостей при установке на радиатор. Однако из-за вязкопластичных свойств припоя происходит временная релаксация и постепенная деформация после пайки. Компенсировать данный эффект не позволяют никакие технологические приемы.

Анализ приведенных выше фактов привел к разработке, начавшейся более 10 лет назад, силовых ключей прижимного типа компании SEMIKRON, конструкция которых не содержит базовой платы. Технология прижимного контакта (pressure contact technology) была внедрена в модулях семейства SKiiP, ставшего одним из самых популярных в секторе высоконадежных преобразователей большой мощности.

Следует отметить, что исключение базовой платы приводит к некоторому ухудшению распределения тепла в основании модуля. Однако этот недостаток компенсируется за счет более тонкого слоя теплопроводящей пасты. Поскольку у прижимных конструкций отсутствует биметаллический эффект, толщина слоя может быть уменьшена со 100 мкм (номинальное значение для стандартных ключей) до 20...30 мкм. При этом главное, чтобы конструктив SKiiP обеспечивал равномерное давление по всей поверхности DBC-платы. С другой стороны, преимущества прижимной системы очевидны: меньшая масса, пониженное тепловое сопротивление и высокая стойкость к термоциклированию.

ПРУЖИННЫЕ КОНТАКТЫ

Внешний вид прижимного модуля MiniIPM с установленным на изолирующую



Рис. 1. Модуль IPM MiniSKiiP® с пружинными контактами и интегральным драйвером

щей подложке интегральным драйвером показан на рисунке 1. В условиях современного производства большое значение имеет пригодность конструкции компонента к автоматизированной сборке, простота его подключения и замены. В модулях семейства MiniSKiiP все силовые и сигнальные соединения осуществляются с помощью пружинных контактов, что обеспечивает следующие преимущества:

- 1) не требуется применение паяльного оборудования при монтаже, исключаются усталостные эффекты пайки;
- 2) установка модуля на радиатор и его подключение к плате управления осуществляется за одну технологическую операцию с помощью одного крепежно-го винта;
- 3) прижим платы управления к контактной поверхности MiniSKiiP производится посредством штатной прижимной крышки;
- 4) замена самого модуля и платы занимает минимум времени;
- 5) пружинные контакты обеспечивают высокую стойкость сборки к механическим воздействиям.

Использование конструктива, подобного MiniSKiiP, обеспечивает определенные удобства и для разработчиков модулей, которые могут оптимизировать положение контактов на DBC-плате для улучшения динамических характеристик. Гибкость в отношении выбора дизайна контактного интерфейса позволяет сводить к минимуму количество внутренних связей, что способствует упрощению конструкции и повышению надежности.

В интеллектуальных силовых модулях MiniSKiiP® IPM отдельно сгруппированы силовые терминалы с близким потенциалом и управляющие входы. Этим обеспечиваются удобство подключения и защита от внешних воздействий. Максимальная токовая нагрузка на одну пружину MiniSKiiP составляет 20 А в длительном режиме, при этом перегрев контакта не превышает 40°C. Сильноточные соединения (выходы и выводы питания) образуются группами из трех параллельных контактов, что повышает допустимый уровень тока до 60 А.

Одной из важнейших проблем силовой электроники является обеспечение

долговременной стабильности параметров в предельных условиях эксплуатации, и в связи с этим многие разработчики подозрительно относятся к пружинным соединениям. Такое отношение вызвано негативным опытом эксплуатации сигнальных разъемов, особенно в условиях высоких вибраций, а также при низких уровнях напряжений и токов. Однако концепции прижимных контактов MiniSKiiP и разъемных соединений принципиально отличаются. Главное различие состоит в величине и направлении действия прижима. У традиционных разъемов величина контактного усилия ограничена необходимостью обеспечения многократных циклов сочленения на уровне около 10 Н/мм². У модулей MiniSKiiP усилие прижима намного выше, и оно направлено вдоль оси контакта. Давление 20...100 Н/мм², создаваемое крепежным винтом и прижимной крышкой при сборке, обеспечивает высокую надежность и долговременную стабильность контактных свойств. Следует отметить, что эта величина соизмерима с аналогичным показателем для резьбовых соединений терминалов стандартных силовых модулей (50 Н/мм²).

Поверхность пружин MiniSKiiP имеет серебряное покрытие, что обеспечивает оптимальные контактные характеристики при давлении на пружину в диапазоне 4...6 Н. Специальные ускоренные испытания подтверждают, что контактная пара «пружина — площадка печатной платы» надежно работает как при традиционных способах металлизации плат (SnPb), так и при новых, соответствующих экологическим директивам RoHS [3,4]. К ним относятся покрытие химическим оловом (Sn) с выравниванием горячим воздухом (HAL — Hot-Air-Leveling) и сплавом «никель-золото» ENIG (Ni/Au). При использовании пружинных контактов не рекомендуется применение органических защитных покрытий (organic surface protection — OSP).

Пружины изготавливаются из высокотехнологичного сплава K88, разработанного компаниями Wieland Werke и Olin Brass специально для данного способа соединения. Материал K88 отличается большим пределом текучести (550 МПа), хорошей способностью к формованию и изгибу, отличной электропроводностью и высокой временной стабильностью механических характеристик в диапазоне температур до 200°C. Для стабилизации контактного сопротивления, исключения нежелательных эффектов электромиграции и нарастания нитевидных кристаллов поверхность пружин имеет металлическую пассивацию. В результате этого механические и контактные свойства выводов MiniSKiiP сохраняются в течение всего срока службы модулей.

Основным критерием при выборе материала покрытия площадок печатной

платы (PCB) является достижение низкого и стабильного переходного сопротивления контактной пары, образованной поверхностью пружины и токонесущими дорожками PCB. Единственным материалом, подходящим для совместного использования практически с любым покрытием печатной платы (сплав NiAu, HAL Sn, химическое олово, сплав PbSn), является серебро (Ag). Неудачной контактной парой являются золото и олово (Au/Sn), поскольку большая разница электрических потенциалов (около 1,5 В) приводит к активному разложению олова и образованию продуктов коррозии.

Надежность пружинных соединений подтверждена и многолетним опытом эксплуатации, прежде всего в лифтовых приводах, где чаще всего используются компоненты семейства MiniSKiiP. Показательным является тот факт, что на сегодня более 300 млн пружин успешно работают в модулях SEMIKRON по всему миру.

SOI-ДРАЙВЕР С УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫМИ КАСКАДАМИ СДВИГА УРОВНЯ

В интеллектуальном модуле MiniSKiiP IPM, содержащем высоковольтный чип-драйвер (HVIC), реализованы основные преимущества силовых ключей данного типа: высокая степень интеграции, надежность и удобство прижимной технологии подключения. Интегральная микросхема устройства управления затворами разработана на основе технологии SOI, впервые внедренной SEMIKRON для компонентов такого типа [5].

Основным преимуществом данной технологии, предусматривающей электрическую изоляцию каждого полупроводникового элемента, является низкий ток утечки при повышенной рабочей температуре. Благодаря изоляции активных компонентов гарантируется полное подавление паразитных триггерных структур и эффекта защелкивания при всех условиях эксплуатации, включая короткое замыкание. Специалисты, работающие с высоковольтными устройствами управления MOSFET/IGBT, имеющими полупроводниковые каскады сдвига уровня, знают, что защелкивание, наблюдаемое зачастую даже в области номинальных токов, может привести к выходу как самого драйвера, так и силовых ключей.

Технология SOI обеспечивает высокий иммунитет к наведенным переходным напряжениям обеих полярностей с уровнями вплоть до напряжения пробоя MOSFET. Все сказанное в сочетании с расширенным температурным диапазоном ($T_{jmax} = 200^\circ\text{C}$) позволяет использовать чип-драйверы SOI для построения высоконадежных IPM.

Интегральный драйвер MiniSKiiP, работающий при напряжении питания 12...17 В, способен управлять тремя верхними и

тремя нижними ключами трехфазного инвертора и чоппером, который может быть использован в качестве тормозного каскада или корректора коэффициента мощности (ККМ). Устройство обеспечивает формирование «мертвого времени» для предотвращения сквозных токов (функция Interlock). Входы управления совместимы с уровнями логики TTL (5 В) и CMOS (3,3 В), время задержки составляет 300 нс. Схема защиты драйвера выполняет все базовые функции, выключая выходные транзисторы при снижении напряжения управления (UVLO — Under Voltage LockOut) и перегрузке по току (OCP — Over Current Protection).

Принципиально новым элементом структуры SOI-драйвера, позволившим резко повысить устойчивость схемы к наведенным перенапряжениям, являются усовершенствованный каскад сдвига уровня в канале управления IGBT верхнего и нижнего плеча. Высокие фронты тока, возникающие при коммутации ключей инвертора, являются причиной возникновения всплесков напряжения, уровень которых пропорционален скорости изменения тока di/dt и паразитной индуктивности цепи коммутации L_s (в соответствии с выражением $dV = di/dt \cdot L_s$). В результате этого между сигнальным выводом эмиттера IGBT и опорной точкой схемы управления наводятся переход-

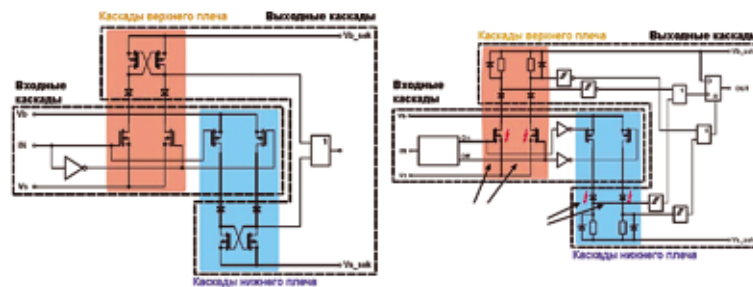


Рис. 2. Схема каскада сдвига потенциала для ключа верхнего уровня BOT (а) и нижнего уровня TOP (б)

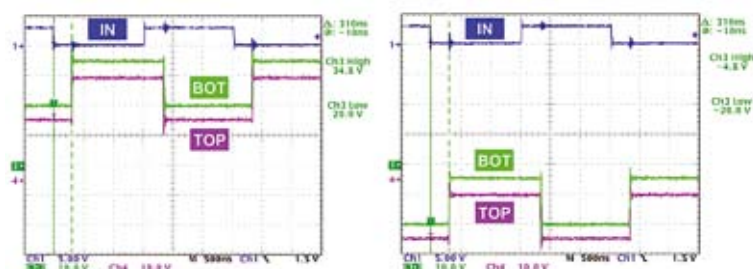


Рис. 3. Характеристики переключения 600-В SOI-драйвера при напряжении сдвига +20 В (а) и -20 В (б)

ные напряжения, полярность которых может быть как положительной, так и отрицательной. Вследствие этого уровень сигнала затвор-эмиттер IGBT может увеличиваться или уменьшаться в зависимости от знака наведенного потенциала. В результате изменяются

динамические характеристики силового ключа, наблюдаются ложные срабатывания, в худшем случае транзистор выходит из строя. Точно также при воздействии переходных перенапряжений может искажаться и токовый сигнал, снимаемый с резистивного шунта

innovation+service

MiniSKiiP® IPM

Сборка без пайки

Расширенный температурный диапазон

	MiniSKiiP IPM	Конкурент 1	Конкурент 2
Т	-40°C...175°C	-20°C...125°C	-40°C...150°C

- Прижимное соединение силовых терминалов и сигнальных контактов
- Интегрированный SOI-драйвер с полностью подавленным эффектом защелкивания
- Выходная мощность до 15 кВт
- Рабочее напряжение 600В и 1200В

Низкое значение теплового сопротивления

	600V MiniSKiiP IPM	Конкурент 1	Конкурент 2
R	0,95°C/Вт	1,42°C/Вт	2,1°C/Вт
P	5,5 кВт	3,7 кВт	3 кВт

Компэл

Тел.: (495) 995-0901
Факс: (495) 995-0902

smkpower@compel.ru
www.compel.ru

Компэл СПб

Тел.: (812) 327-9404
Факс: (812) 327-9403

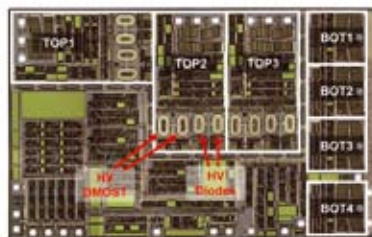
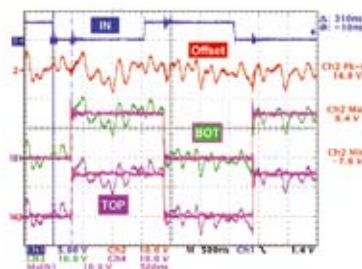


Рис. 4. а) работа 600-В SOI-драйвера при воздействии шумового смещающего сигнала; б) топология кристалла драйвера

схемы защиты — негативные последствия в этом случае аналогичны.

При работе маломощных IPM амплитуда коммутационных выбросов обычно не превышает предельных для IGBT значений, поскольку малы величины di/dt и L_s . Однако с ростом мощности уровень переходных перенапряжений растет лавинообразно, делая этот эффект опасным как для силового ключа, так и для драйвера. Новая концепция каскада сдвига уровня была разработана специально для защиты выходов схемы управления от наведенных со стороны силовых каскадов перенапряжений обеих полярностей.

Упрощенная принципиальная схема усовершенствованных каскадов сдвига потенциала для ключей верхнего и нижнего уровня (TOP и BOT) показана на рисунке 2. Каждый каскад управляется по двум независимым каналам, в которых используются полевой транзистор и последовательный блокирующий диод. В зависимости от полярности напряжения между входными и выходными каскадами драйвера, для преобразования сигнала используется схема сдвига TOP или BOT. При этом неработающий канал блокируется соответствующим диодом, а для формирования выходного сигнала устройства используется логический вентиль (OR).

Реализация схемы сдвига каскада TOP (2б) оказывается более сложной, поскольку не существует достаточно хороших высоковольтных р-MOS-транзисторов. По этой причине в данном случае используется импульсная схема преобразования сигнала на высоковольтном nMOS-транзисторе и высоковольтных диодах. Импульсный режим работы позволяет снизить величину перекрестных токов и уровень потерь переключения.

Усовершенствованная концепция сдвига уровня позволяет существенно повысить иммунитет драйвера к вариациям опорных напряжений, величина которых ограничивается только напряжением пробоя MOSFET. Работа схемы сдвига при статическом смещении опорного сигнала на +20 и -20 В демонстрируется с помощью графиков, приведенных на рисунке 3. Устройство с легкостью компенсирует и динамиче-

ские помехи, как это показано на рисунке 4а. Обратите внимание, что импульсы управления затворами сохраняют почти идеальную форму, несмотря на воздействие шумового сигнала, смещающего потенциал эмиттера относительно напряжения на опорном выводе драйвера. Расположение основных элементов структуры на кристалле SOI-драйвера, включая высоковольтные DMOS-транзисторы и диоды схемы сдвига уровня для обоих каналов, показано на рисунке 4б.

Изолирующая DBC-плата MiniIPM изготавливается из оксида алюминия Al_2O_3 толщиной 0,38 мм со слоем омеднения 0,2 мм, нанесенным на обе стороны керамики. Первым этапом процесса сборки является установка силовых чипов и датчика температуры на керамику методом пайки. Кристалл HVIC и SMD-резисторы затворов соединяются с DBC-платой с помощью токопроводящего клея. Контакты, расположенные на верхнем слое силовых чипов, подключаются к токонесущим шинам алюминиевыми проводниками диаметром 300 мкм методом ультразвуковой сварки. Диаметр проводников, используемых для сигнальных подключений, составляет 50 мкм. Далее пластиковый корпус с размещенными в нем пружинными контактами устанавливается на керамическую DBC-плату и заливается силиконовым гелем, обеспечивающим герметичность и улучшающим распределение тепла.

Необходимо отметить, что установка чипа драйвера непосредственно на керамику позволяет эффективно отводить от него тепло, что особенно важно при работе схемы управления на высоких частотах. При размере кристалла 4,9×3,1 мм удается обеспечить величину теплового сопротивления около 4°C/Вт. Для сравнения стоит заметить, что при установке аналогичного чипа в корпусе SOP28 значение R_{th} составляет около 75°C/Вт. При токе управления затвором около 1 А это позволяет драйверу IPM эффективно управлять силовым инвертором мощностью до 15 кВт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным исследования рынка силовых полупроводниковых компонентов,

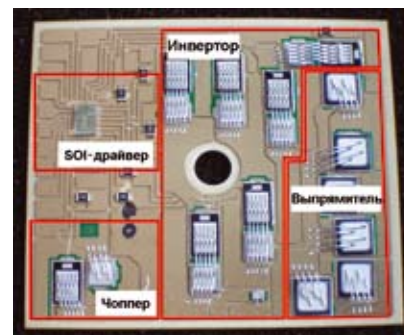


Рис. 5. DBC-плата модуля MiniSKiiP с интегрированным SOI-драйвером

проводимого британским исследовательским институтом IMS (British Market Research Institute), доля SEMIKRON в области производства миниатюрных модулей CIB составляет 30% в мире и более 46% — в Европе. Ожидается, что популярность данных компонентов в виде IPM с интегрированным драйвером будет расти. Это подтверждается постоянно растущим спросом на модули IPM, предназначенные для разработки промышленных приводов средней мощности.

Для создания интеллектуального силового модуля на базе MiniSKiiP была разработана интегральная высоковольтная микросхема (HVIC) 7-канальной схемы управления затворами IGBT. Кристалл драйвера устанавливается непосредственно на керамическую DBC-подложку модуля, что обеспечивает эффективный отвод тепла и кратчайшие связи выходов драйвера с затворами IGBT при минимальной индуктивности цепей управления. Благодаря усовершенствованной концепции сдвига уровня новой схемы управления удалось существенно повысить помехозащищенность и надежность работы нового IPM. Модули серии MiniIPM способны стать новым промышленным стандартом в диапазоне приводных мощностей 5...15 кВт.

ЛИТЕРАТУРА

1. U. Scheuermann, MiniSKiiP® IPM — Advanced Module Architecture for Medium-Power Applications, SEMIKRON International
2. U. Scheuermann, P. Beckedahl: The Road to the Next Generation Power Module — 100% Solder Free Design, Proc. CIPS 2008, ETG-Fachbericht 111, 111–120, Nürnberg, 2008.
3. F. Lang, U. Scheuermann: Reliability of Spring Pressure Contacts under Environmental Stress, Microelectronics Reliability 47 (2007), 1761–1766.
4. А. Колпаков, Надежность пружинных контактов в условиях индустриальных сред. «Силовая Электроника» №4, 2006.
5. B. Vogler, M. Roßberg, R. Herzer, L. Reußer, T. Wurm: 600V Converter/Inverter/Brake (CIB) — Module with integrated SOI Gate Driver IC for Medium-Power Applications, Proc. CIPS 2008, ETG-Fachbericht 111, 261–265, Nürnberg, 2008.