

Перспективный комплект полупроводниковой элементной базы источников вторичного электропитания

Владимир ГРОМОВ
Сергей ЕГОРОВ
Виктор СМИРНОВ
Олег СОПОВ
Дан ЦИЛИАКУС
Александр ШЕСТАКОВ
Павел ЯСТРЕБОВ

В статье описан современный комплект полупроводниковых приборов, состоящий из интегральных микросхем, диодов и диодных мостов и предназначенный для блоков электропитания радиоэлектронной аппаратуры с распределенной структурой. Функциональный состав комплекта и рабочие характеристики приборов дают возможность широкого выбора для реализации различных современных топологий преобразователей (в том числе резонансных с фазовым ШИМ, с синхронным выпрямлением) и позволяют удовлетворить растущие потребности разработчиков современных блоков питания с высокими значениями КПД (92% и выше) и удельной мощности (выше 70 кВт/дм³).

Размер кристалла входящих в комплект однофазных и трехфазных диодных выпрямительных мостов в малогабаритных керамических корпусах, а также дискретных выпрямительных диодов в кремниевых корпусах позволит дополнительно сэкономить место в объеме первичных AC/DC-преобразователей.

Сдвоенный диод Шоттки с уменьшенным прямым падением и мощный быстро восстанавливающийся диод (БВД), также в конструктивном исполнении для поверхностного монтажа, найдут широкое применение в современных импульсных преобразователях.

Введение

Возросшие за последние годы требования к источникам вторичного электропитания (ИВЭП) заставляют трактовать понятие «эффективность источника питания» не просто как коэффициент полезного действия (КПД), а в более широком смысле — как совокупность КПД, массо-габаритных показателей, эксплуатационных и электрических параметров. Такая трактовка диктует необходимость разработки не столько новых схемотехнических решений конкретных источников вторичного электропитания, сколько новых принципов в организации электропитания системы (комплекса) в целом. Наиболее перспективным и «жизненным» подходом является организация системы распределенного электропитания, когда в аппаратуре комплекса предусматривается не один общий источник питания, а несколько, каждый из которых оптимизирован под конкретную нагруз-

ку и приближен к ней. С учетом современного уровня миниатюризации элементной базы такие распределенные блоки питания могут быть выполнены (при условии единого конструктивного исполнения) на той же плате, что и устройство, которое они питают. При этом становится возможным наиболее оптимально распределить электрическую энергию по составным частям аппаратуры с учетом наибольшего количества факторов, влияющих на эффективность в указанном выше смысле.

Традиционно наиболее распространенными первичными источниками электропитания являются однофазные или трехфазные сети переменного тока частотой 50, 60 или 400 Гц. По принципу трансформации сетевого напряжения все ИВЭП можно разделить на два класса: первый — с непосредственной трансформацией напряжения на низкой частоте сети и второй — с промежуточным преобразованием предварительно выпрямленного сетевого напряжения в переменное с более высокой частотой и с последующей трансформацией напряжения на частоте преобразования. Первый класс ИВЭП обладает меньшей эффективностью из-за больших габаритов и массы низкочастотных трансформаторов, выходных фильтров. Такие источники в современных и перспективных комплексах практически не используются. Второй класс ИВЭП позволяет уменьшить габариты и массу источника за счет снижения объема трансформаторов и выходных LC-фильтров и как нельзя лучше подходит для распределенного электропитания. Современные ИВЭП этого класса, как правило, ре-

ализуются на базе сложных микросхем контроллеров, в которые собраны все необходимые для реализации той или иной топологии преобразования узлы и блоки. Такие микросхемы, кроме основной задачи, осуществляют еще и массу вспомогательных функций: всевозможную защиту, управление включением/выключением, индикацию состояния силовых элементов и нагрузки.

Совершенствование микросхем контроллеров для ИВЭП идет по ряду направлений:

- более полный учет специфических особенностей той или иной топологии преобразования;
- переход с биполярной на БиКМОП-технологии со снижением потребляемого тока;
- повышение максимальной рабочей частоты;
- внедрение синхронного выпрямления;
- развитие контроллеров для полумостовых, мостовых и многофазных инверторов;
- введение дополнительных потребительских функций, направленных на повышение экономичности и надежности.

Главным стимулом для осуществления новых разработок являются требования, предъявляемые к общепромышленной аппаратуре и аппаратуре специального назначения:

- расширение рабочего температурного диапазона;
- повышение надежности даже в условиях перегрузок;
- повышение устойчивости к воздействиям внешних факторов;
- повышение КПД источников питания до 92% и более;
- увеличение удельной мощности до 70 кВт/дм³ и более;

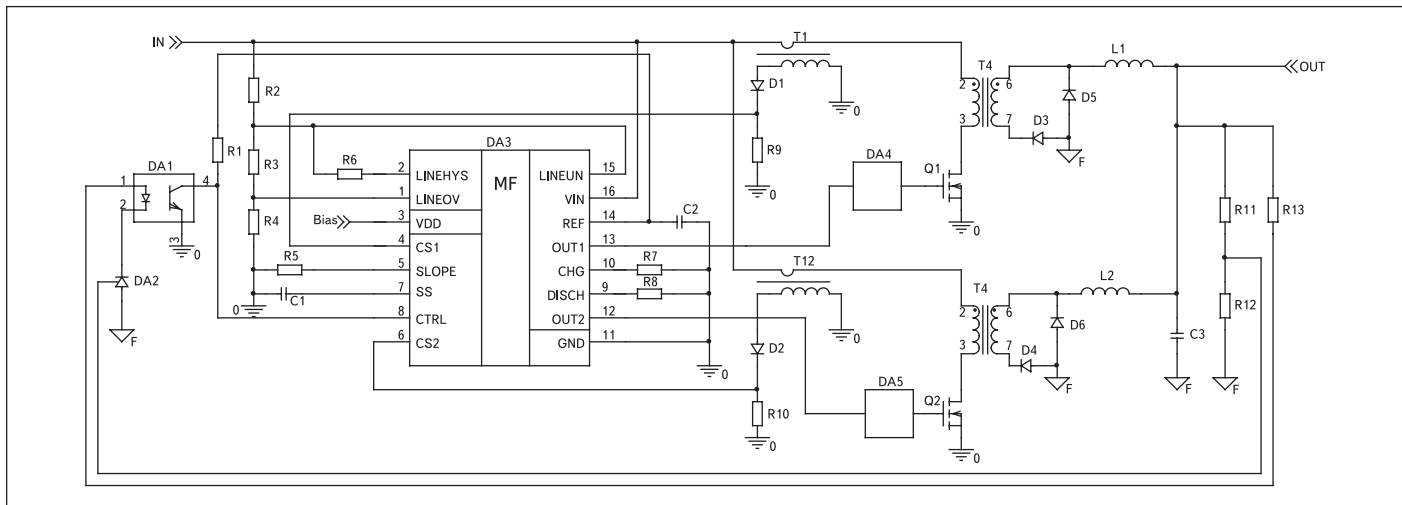


Рис. 1. Упрощенная схема двухфазного преобразователя на ИС1

- снижение напряжения питания современной элементной базы высокой степени интеграции и быстродействия до 3,3–1,2 В и переход в субвольтовый диапазон в ближайшем будущем;
- улучшение качества низких напряжений питания: точности и динамической стабильности, снижение пульсаций.

Данный комплект полупроводниковой элементной базы ИВЭП включает четыре микросхемы, четыре диодных выпрямительных моста, четыре дискретных выпрямительных диода, дискретный БВД и сдвоенный диод Шоттки.

Интегральные микросхемы, входящие в комплект

Интегральная микросхема ИС1, выполненная по БиКМОП-технологии, — это двухфазный ШИМ-контроллер, оптимизированный на действующий ток нагрузки 50–100 А. Частота коммутации фаз — 1 МГц, сдвиг — 180°; имеет независимый контроль и активное выравнивание токов фаз. Эта микросхема в наибольшей степени подходит для питания систем связи или радиолокации (входное напряжение — 36–76 В) благодаря специфике двухфазной схемы (минимальное время реакции на импульсный ток нагрузки и минимальные пульсации выходного напряжения). Типовая упрощенная схема включения приведена на рис. 1.

Интегральная микросхема ИС2, выполненная по биполярной технологии с диодами Шоттки, представляет собой контроллер с фазовой модуляцией, оптимизированный для применения в качестве схемы управления импульсными резонансными ИВЭП, работающими на частотах до 2 МГц. Функционально микросхема оснащена исчерпывающе:

- четыре квазикомплементарных выходных каскада на импульсный ток до 3 А позволяют напрямую (или через развязывающие трансформаторы) управлять мощными МОП-транзисторами силового моста;

- максимальная частота генерирования микросхемы свыше 2 МГц;
- имеются возможности компенсации наклона пилы и регулирования величины фазового сдвига от 0 до 180°;
- величина тока потребления в состоянии «Выключено» не более 600 мкА. Кроме того, имеются:
- широкополосный усилитель сигнала ошибки;
- раздельная установка задержек включения для каждой половины моста;
- задержка распространения сигнала через схему не более 150 мкс;
- функция мягкого запуска;
- синхронизация по внешнему сигналу;
- подстраиваемый на пластине источник опорного напряжения на 5 В;
- защита по току с функцией полного рестарта при повторяющихся перегрузках;
- защита от пониженного напряжения питания с гистерезисом, при срабатывании которой все четыре выхода переводятся в состояние низкого уровня (включены нижние выходные транзисторы).

Управление мощным мостовым каскадом осуществляется с помощью сдвига по фазе момента переключения одной половины моста относительно другой. Для повышения КПД ИВЭП на высоких частотах могут использоваться резонансные методы с коммутацией ключевого элемента при нулевом напряжении (ZVS) и/или токе (ZCS).

Микросхема может применяться в источниках электропитания с обратной связью как по напряжению, так и по току, возможна также организация прямой связи по входному напряжению. Типовая упрощенная схема включения приведена на рис. 2.

Микросхема ИС3 представляет собой сдвоенный драйвер затворов мощных МОП-транзисторов или БТИЗ, включенных в конфигурации полумоста с напряжением питания до 600 В. Типовая схема включения микросхемы приведена на рис. 3. Драйвер ниж-

него транзистора полумоста «привязан» к «земле», в то время как драйвер верхнего транзистора «привязан» к выходу полумоста и получает питание от емкости вольтдобавки, заряжаемой от шины питания нижнего драйвера через внешний диод в интервалы времени, когда на выходе полумоста низкий уровень напряжения. Такой подход к организации питания верхнего драйвера реализуем, если полумост постоянно переключается с определенной частотой, что чаще всего и имеет место в типовых преобразователях. Если применение подразумевает произвольное переключение драйверов, то питание верхнего драйвера должно осуществляться от отдельного «плавающего» источника.

Внутри микросхемы с целью высоковольтной изоляции ее узлов использована уникальная технология на основе кремниевых структур с полной диэлектрической изоляцией (КСДИ). Входные логические каскады и сами драйверы выполнены по КМОП-технологии, которая обеспечила хорошее быстродействие при незначительном собственном токе потребления. Для передачи логических сигналов в верхний драйвер в микросхеме применен высоковольтный быстродействующий каскад сдвига уровня на двух высоковольтных МОП-транзисторах. Оконечные *n*-канальные транзисторы обеспечивают пиковые токи заряда и разряда затворной емкости около 4 А. Время включения t_{on} и выключения t_{off} микросхем ИС3, в зависимости от емкости нагрузки, составляет 25–120 нс и 15–80 нс соответственно. Выходные токи драйверов ИС3 позволяют использовать их в силовых преобразовательных устройствах мощностью до 3–5 кВт, в том числе с цифровым управлением, в диапазоне частот до сотен кГц.

Микросхема ИС4 предназначена для организации синхронного выпрямления импульсов напряжения во вторичной обмотке прямоходового преобразователя. Кристалл микросхемы изготавливается по БиКМОП-

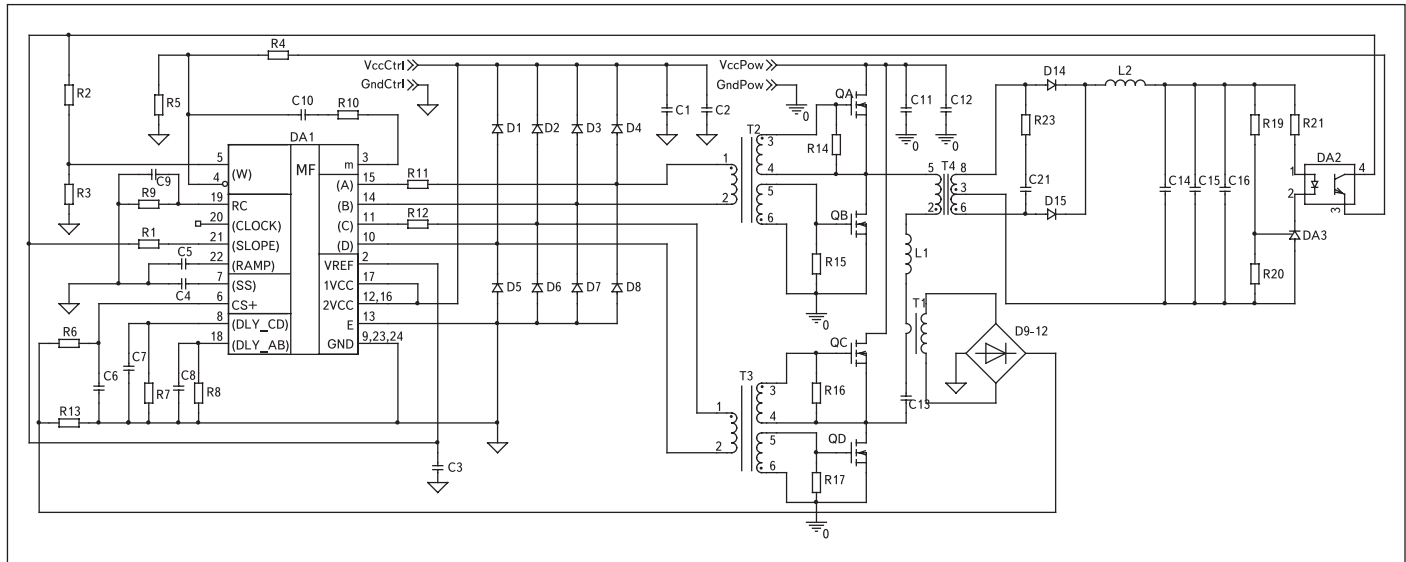


Рис. 2. Упрощенная схема резонансного преобразователя на IC2

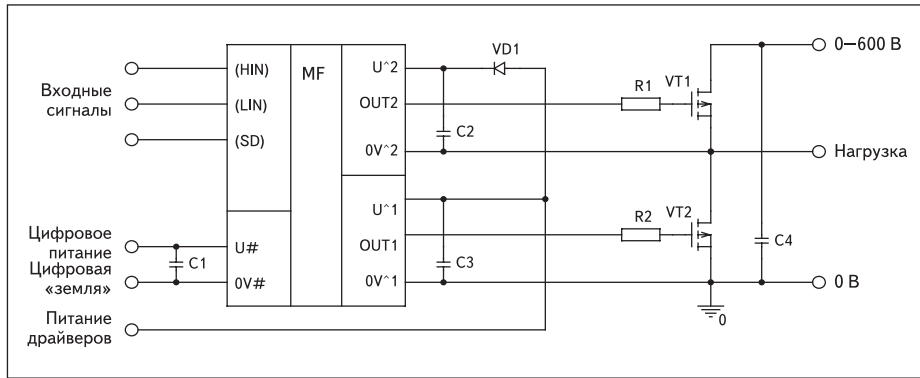


Рис. 3. Типовая схема включения микросхемы IC3

технологии, что позволят получить отличные характеристики.

В стандартной топологии прямоходового преобразователя силовой трансформатор применяется для обеспечения функции гальванической развязки между входом и выходом и понижения выходного напряжения до необходимого уровня. Стандартно быстродействующие импульсные диоды использу-

ются для выпрямления напряжения во вторичной обмотке трансформатора. Падение напряжения на этих диодах при протекании больших токов нагрузки является одним из факторов, существенно снижающих КПД преобразователя в целом. Значительный выигрыш в КПД дает применение для этой цели диодов Шоттки. Современные диоды Шоттки имеют сравнительно низкие прямые

падения напряжения на больших токах, но, тем не менее, в типовых схемах выпрямителей на них неизбежно теряется до нескольких десятков ватт мощности. Для повышения КПД вместо диодов Шоттки могут быть использованы мощные *n*-канальные МОП-транзисторы с соответствующей схемой управления, которая обеспечивает синхронизацию их включения и выключения с импульсами в первичной цепи. Применение транзисторных ключей вместо диодов Шоттки позволяет значительно снизить потери мощности в преобразователе и тем самым повысить его КПД. Наиболее значительное повышение КПД при реализации синхронного выпрямления достигается для преобразователей с низким выходным напряжением (1,2–3,3 В).

В синхронном выпрямителе IC4 выполняет функции синхронизации и защиты и содержит два мощных драйвера затворов внешних *n*-канальных МОП-транзисторов.

На рис. 4 приведена упрощенная схема прямоходового преобразователя с синхронным выпрямителем, выполненным на микросхеме IC4: TV1 — силовой трансформатор; VT1 — мощный транзистор, которым управляет ШИМ-контроллер или схема управления. Импульсный трансформатор VT2 обеспечивает передачу синхроимпульсов во вторичную цепь и управляется сигналом, инверсным по отношению к сигналу на затворе VT1. VT2 и VT3 — синхронные ключи вторичной цепи, затворы которых подключены к выходам FG и CG IC4. Дроссель L и конденсатор C6 образуют выходной LC-фильтр для уменьшения пульсаций напряжения на нагрузке. На рис. 4 также изображена цепь питания IC4: элементы VD1 и C5 обеспечивают выпрямление и фильтрацию напряжения вторичной цепи, VT1 и VD2 образуют параметрический стабилизатор напряжения.

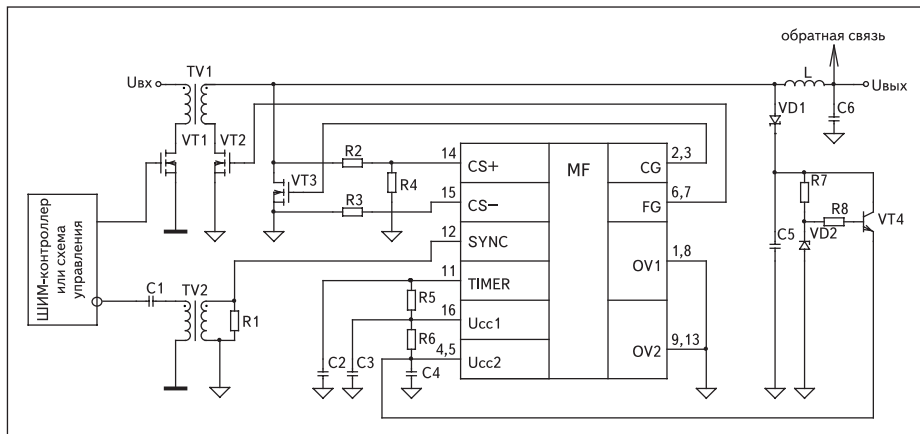


Рис. 4. Упрощенная схема синхронного выпрямителя на IC4

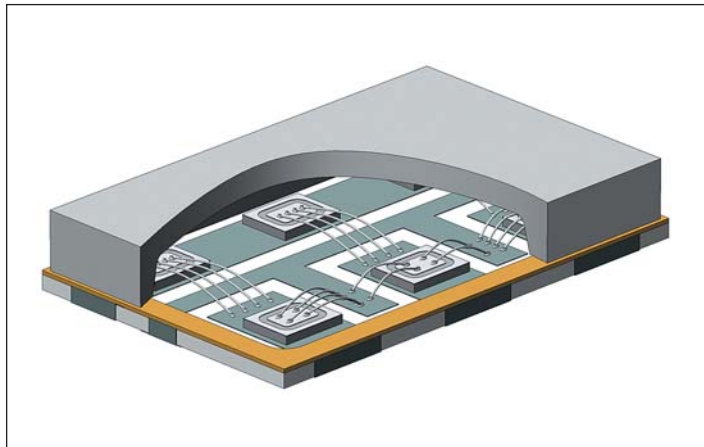


Рис. 5. Конструкция керамического корпуса для 5-амперных мостов

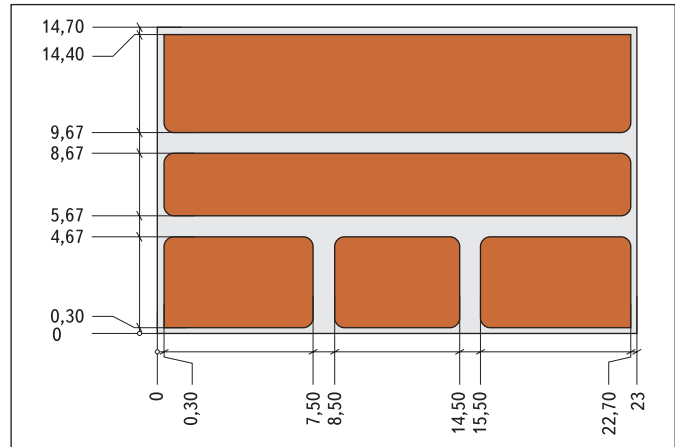


Рис. 6. Расположение выводов 5-амперных трехфазных мостов

Диодные мосты и диоды, входящие в комплект

Как правило, в сложной, со значительным энергопотреблением общепромышленной аппаратуре и аппаратуре специального назначения первичными источниками электропитания являются однофазные или трехфазные сети переменного тока частотой 50, 60 или 400 Гц. Для выпрямления сетевого напряжения разработана серия однофазных и трехфазных диодных мостов. Серия состоит из полной трехмерной матрицы типоминиалов, отличающихся по прямому току (5/30 А), по обратному напряжению (600/1000 В) и по количеству диодов в мосте (4 — однофазный мост / 6 — трехфазный мост). Мосты набираются из четырех типов кристаллов высоковольтных диодов, специально созданных для работы в расширенном рабочем температурном диапазоне. Кроме мостов, эти же кристаллы используются в дискретных выпрямительных диодах в кремниевых корпусах по размеру кристалла, обеспечивая минимально возможные массо-габаритные параметры при поверхностном монтаже на печатные платы.

Состав выпрямительной серии и характеристики приборов практически полностью перекрывают потребности разработчиков современных ИВЭП и должны ликвидировать образовавшийся дефицит в приборах такого класса и назначения.

Сдвоенный диод Шоттки (2×20 А) с уменьшенным прямым падением (0,5 В на прямом токе 20 А) найдет широкое применение в импульсных выпрямителях вторичной цепи преобразователей. Обратное напряжение диода 40 В обеспечивает весь типовой ряд выходных напряжений как однотактных, так и двухтактных преобразователей.

Мощный высоковольтный БВД (10 А/400 В) с временем восстановления обратного сопротивления t_{RR} 50 нс может быть широко использован в качестве демпферного, в корректорах коэффициента мощности и в других применениях.

Конструктивное исполнение комплекта

Микросхемы комплекта выполнены в стандартных малогабаритных металлокерамических корпусах, обеспечивающих надежную защиту кристаллов от воздействия внешних воздействующих факторов. Типы использованных корпусов и фотографии приведены в таблице.

Таблица. Типы корпусов

Условное обозначение микросхемы	Тип корпуса	Фото корпуса
ИС1, ИС3, ИС4	НО4.16-2В	
ИС2	4118.24-1	

Диодные мосты собираются в двух специально разработанных корпусах. На рис. 5 показана конструкция керамического корпуса для сборки 5-амперных диодных мостов (с разрезом в крышке). Основанием корпуса служит керамическая плата с двусторонней металлизацией и переходными соеди-

нениями на торцах платы. На монтажные площадки верхней металлизации напаяны и разварены алюминиевой проволокой Ø100 мкм кристаллы диодов, как показано в разрезе. Кристаллы диодов и межсоединения защищаются кремнийорганическим компаундом (на рисунке не показан). Керамическая крышка приклеивается специальным клеем, обеспечивая необходимую герметичность и защиту диодов, внутренних соединений от воздействия внешней среды. Габариты корпуса с крышкой составляют 24×15,5×4 мм. Расположение выводов для трехфазного диодного моста в этом корпусе показано на рис. 6.

На рис. 7 показана конструкция корпуса для сборки 30-амперных диодных мостов. В основу конструкции положен вариант корпуса для силовых модулей с изолированным основанием. Как и в случае 5-амперных мостов, используется тонкая керамическая плата с двусторонней металлизацией. На монтажные площадки верхней металлизации напаяны и разварены алюминиевой проволокой Ø300 мкм кристаллы диодов. К выводным монтажным площадкам на верхней стороне платы припаиваются медные угольковые выводы. Кристаллы диодов и проволоочные соединения защищаются кремнийорганическим компаундом. Нижней стороной плата припаивается к медному основанию — фланцу. К фланцу предварительно припаивается стальная боковая рамка для защиты кристал-

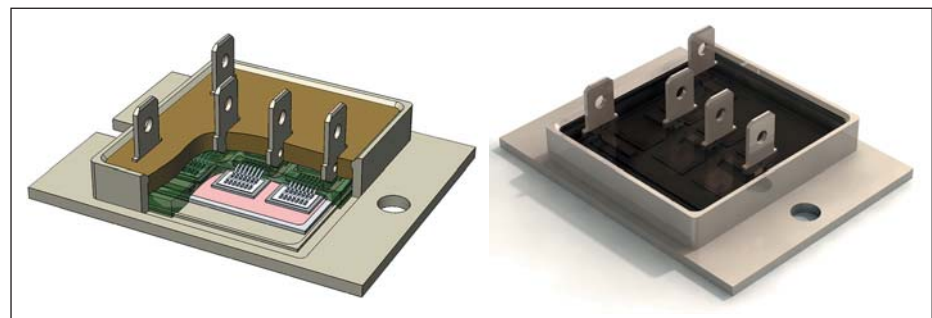


Рис. 7. Конструкция и внешний вид корпуса для 30-амперных мостов

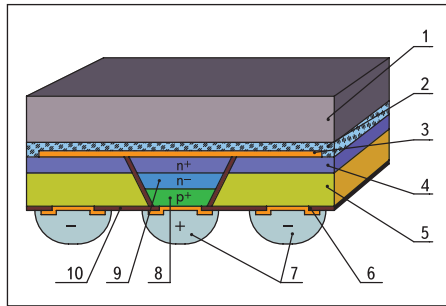


Рис. 8. Схематический разрез диода в кремниевом корпусе по размеру кристалла:
 1 — крышка (Si); 2 — стекло; 3 — алюминий (Al);
 4 — кремний n⁺;
 5 — высоколегированный поликремний;
 6 — алюминий (Al); 7 — припойные столбики;
 8 — кремний p⁺; 9 — кремний n⁺;
 10 — окись кремния SiO₂

лов и внутренних соединений от механических воздействий. Все детали предварительно никелируются для предохранения от окисления. После пайки корпус герметизируется за-

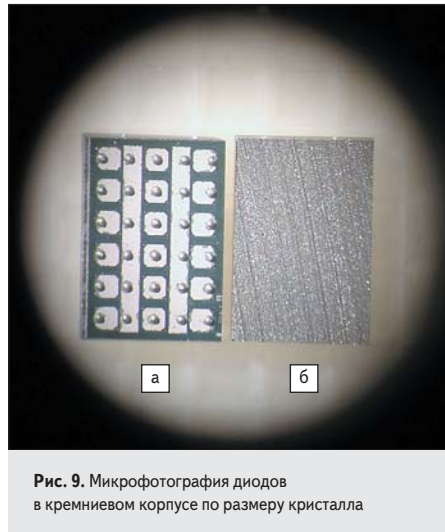


Рис. 9. Микрофотография диодов в кремниевом корпусе по размеру кристалла

ливкой специальным компаундом с последующей сушкой. После сборки основание корпуса проходит операцию шлифовки для обеспечения требуемой плоскостности.

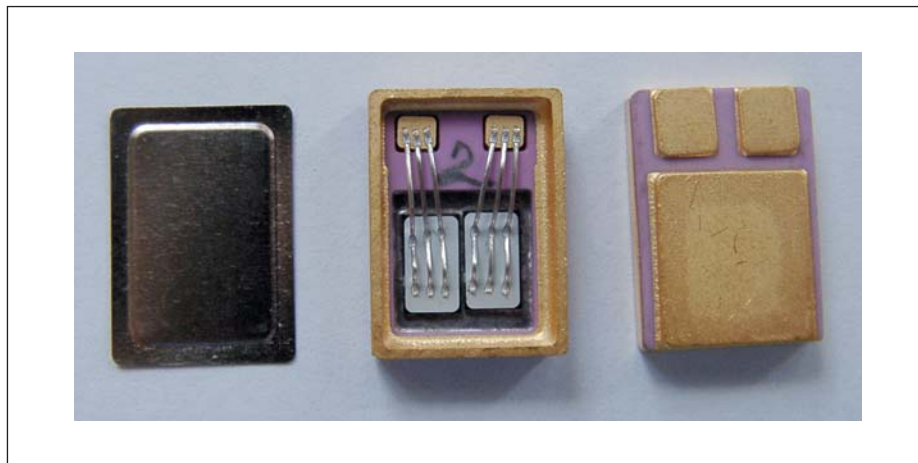


Рис. 10. Фотография корпуса для диода Шоттки и БВД

Для крепления 30-амперных диодных мостов к радиатору в фланце предусмотрены паз и отверстие под винты М5. Выводы корпуса допускают подключение токоподводящих проводов пайкой или с помощью стандартных 6-миллиметровых зажимных наконечников. Габаритные размеры корпуса — 57,5×44,5×17,5 мм.

Дискретные выпрямительные диоды в кремниевых корпусах по размеру кристалла «собираются» без использования традиционных сборочных операций, таких как посадка кристалла, разварка выводов и пр. Все «сборочные» процессы выполняются на пластине групповым способом (включая маркировку) вплоть до разделения корпусов с помощью сквозной резки. Тестирование по электропараметрам также выполняется на пластине до разделения.

Структура диода в кремниевых корпусах по размеру кристалла показана в схематическом разрезе на рис. 8.

Электрические параметры диода:

- Uобр. = 600–1000 В;
- Iпр. = 5 А;
- Iпр. имп. = 60 А;
- Uпр. = 1,2 В.

Габаритные размеры:

- длина — 4 мм;
- ширина — 3 мм;
- высота — 0,5 мм;
- высота столбиков — 0,15 мм;
- шаг столбиков — 1,25 мм.

На рис. 9 приведена фотография диодов в кремниевых корпусах по размеру кристалла, повернутых припойными столбиками вверх (рис. 9а) и кремниевой крышкой вверх (рис. 9б).

Диод Шоттки и БВД выполнены в стандартном малогабаритном металлокерамическом корпусе для поверхностного монтажа КТ-94-3, показанном на рис. 10. Для посадки кристаллов используется мягкий припой. ■