Модульные радиационно-стойкие гибридно-пленочные DC/DC-преобразователи мощностью до 600 Вт

В статье рассматриваются высокоэффективные радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи повышенной мощности (200–600 Вт), предназначенные для работы в составе систем энергоснабжения космических аппаратов (КА) и спутников. Применение гибридной технологии, эффективных схемотехнических решений и полупроводниковых силовых ключей MOSFET с небольшими потерями мощности, материалов с высокой теплопроводностью обеспечили высокую энергетическую плотность и небольшой вес модулей. Предлагаются модули для работы в бортовых сетях с номинальными напряжениями 28, 42 и 100 В, отвечающие всем основным требованиям, предъявляемым к изделиям космического назначения. Модули выпускаются предприятиями, входящими в Китайскую корпорацию аэрокосмической науки и техники (China Aerospace Science and Technology Corp., CASC) и Китайскую корпорацию электронных технологий (China Electronics Technology Group Corp., CETC).

Виктор ЖДАНКИН,
инженер,
viktor@prochip.ru

К источникам вторичного электропитания, входящими в состав систем энергоснабжения КА и занимающих весьма значительную долю объема всей бортовой аппаратуры, предъявляется большое количество жестких требований. Одним из важнейших является высокая энергетическая плотность и небольшой вес источников вторичного электропитания, что продиктовано высокой стоимостью вывода единицы массы полезной нагрузки на орбиту. Кроме того, к источникам вторичного электропитания космического применения предъявляются высокие требования по надежности и стойкости к дестабилизирующим факторам космического пространства (ДФ КП) для обеспечения длительных сроков активного функционирования.

Источники питания выполняются в виде элементов не только в составе функциональных узлов бортовой аппаратуры, но и в виде отдельных блоков. Широкое распространение приобрели распределенные системы питания: модули питания малой и средней мощности устанавливаются непосредственно около питаемого узла – процессора, ПЛИС и т.д. Такой метод существенно упрощает разводку силовых цепей в случае использования компонентами нескольких линий питания с разными напряжениями.

Однако для применения в качестве централизованных преобразователей напряжения в системах электропитания бортовой аппаратуры современных КА и спутников требуются модульные DC/DC-преобразователи повышенной мощности с высокой энергетической плотностью, низким профилем, способными разместиться в ограниченном объеме. Государственный заказ на разработку подобных модулей для применения в бортовой аппаратуре специализированных КА на новой платформе для военных применений был размещен на двух предприятиях китайской космической отрасли: в Восточно-китайском научно-исследовательском институте микроэлектроники и Сианьском технологическом институте микроэлектроники (Xi'an Microelectronic Technology Institute, XMTI). Далее в статье представлены модульные DC/DC-преобразователи, разработанные в результате проведенной работы и отвечающие всем основным требованиям, предъявляемым к источникам космического назначения.

Заметим, что продукция этих предприятий китайской космической отрасли также успешно применяется в российских проектах по созданию КА. Российские специалисты отмечают высокое качество и надежность продукции.

Модульные радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи повышенной мощности для современных КА специального назначения от Восточно-китайского НИИ микроэлектроники

Для достижения максимальной энергетической плотности конструкции преобразователей при допустимой тепловой напряженности используется гибридная технология на толстых пленках. Достоинства гибридно-пленочной технологии заключаются в сравнительной простоте, способности рассеивать значительные мощности, обеспечении хороших условий отвода тепла от всех теплонагруженных элементов конструкции к поверхности теплоотвода.

В качестве материала подложки используется оксидированный алюминий (Al_2O_3) с содержанием оксида алюминия не менее 99,7%, обеспечивающий качественное изготовление пленочных гибридных микросхем. На керамику наносится металлизационное покрытие с высокой адгезией и стойкостью к термоциклированию для создания на определенной части подложки-держателе токопроводящего слоя, к которому присоединяются полупроводниковые кристаллы и выводы. Керамика на основе оксида алюминия обла-

дает высокой теплопроводностью и стабильностью электрического сопротивления с повышением температуры. Обратная сторона подложки металлизирована плакированной медью, что позволяет осуществлять припаивание платы к металлическому основанию корпуса методом оплавления. Заметим, что алюмооксидная керамика (Al_2O_3) – наиболее стойкая по отношению к радиации разных видов: нейтронной, протонной, рентгеновской и γ-излучения. Электрическая прочность алюмооксидной керамики при облучении нейтронами вплоть до флюенса 10^{20} см$^{-2}$ не изменяется. При облучении гамма- и рентгеновскими лучами существенные изменения в керамике не обнаруживаются. Протонное облучение с энергией 680 МэВ и флюенсом $5{\cdot}10^{14}$ см$^{-2}$ [1] не вызывает заметного ухудшения свойств алюмооксидной керамики.

Толстопленочные резисторы изготавливаются методом трафаретной печати на керамической подложке с помощью специальной пасты.

Силовые MOSFET, диоды Шоттки и некоторые чип-конденсаторы также устанавливаются на подложку пайкой оплавлением; для монтажа некоторых чип-конденсаторов используется электропроводящая клеевая композиция; электрические соединения кристаллов таких силовых полупроводниковых приборов, как MOSFET и диоды Шоттки выполняются алюминиевой проволокой; электропроводящая клеевая композиция применяется для установки на подложку кристаллов таких «несиловых» полупроводниковых элементов, как диоды, транзисторы и ШИМ-контроллеры, а для их соединения применяется золотая проволока; непроводящий клей используется для монтажа трансформатора к основанию корпуса. Клеящие материалы имеют максимально достижимые эксплуатационные характеристики в части теплопроводности, электропроводности, прочности, стабильности в условиях воздействия дестабилизирующих факторов космического пространства. Применение склеивания вместо других способов соединения особенно эффективно для снижения массогабаритных характеристик изделий микросборочного производства. В источниках питания ведущих мировых производителей гибридно-пленочных источников электропитания около 90% всех пассивных и активных компонентов смонтированы на керамической плате с помощью клеящих материалов.

Рассредоточение теплонапряженных элементов обеспечивает равномерность выделения тепла по поверхности сборки. Уменьшение теплового сопротивления обеспечивается хорошим тепловым контактом между слоями разнородных материалов (оксидированный алюминий, припой, клей, корпус) и высокой теплопроводностью самих материалов.

Собранная плата устанавливается в металлический корпус. Для герметизации металлического корпуса преобразователей применяется шовно-роликовая сварка. Интеграция системы шовно-роликовой сварки в атмосферные камеры с сухим высококачественным азотом с возможностью контроля параметров влажности и определенного состава атмосферы является актуальной, так как продлевает срок службы и уменьшает вероятность выхода изделия из строя. При герметизации методом шовно-роликовой сварки корпуса не теряют герметичность – показатель герметичности корпусов по скорости утечки гелия не превышает $5{\cdot}10^{-5}$ Па·м^3/с (малые течи). Во избежание термических напряжений и растрескивания корпуса изготавливаются из материалов, имеющих близкие по значению температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР). Крышки и уплотнительные кольца предварительно плакированы никелем, нанесенным электролитическим методом.

Изоляция между выводами и корпусом осуществляется через слой запресованного припойного стекла.

Выводы модулей выполнены из меди с золотым покрытием толщиной 1,3~5,7 мкм. Корпус, выполненный из холоднокатанной стали, покрыт никелем толщиной 4~15 мкм; выводы расположены горизонтально для объемного монтажа. Внешний вид модуля HDCD/42-28-430/SP показан на рис. 1.

При создании преобразователей особое внимание уделялось высоте конструкции и выходу мощности. В рассматриваемых приборах используется мостовая топология, трансформаторная развязка в контуре обратной связи, топология управления, обеспечивающая электрическую изоляцию между входными и выходными цепями. Выбранная топология включает в себя мостовой преобразователь на первичной стороне и два дросселя на вторичной стороне, сумма токов в которых равна току нагрузки. Эта топология известна как удвоитель тока. Преимущества преобразователей с удвоителем тока заметно проявляется в мостовой схеме, предназначенной для больших мощностей в нагрузке. Низкий уровень потерь в транзисторах дополняется малыми размерами силового трансформатора и простой конструкцией двух выходных дросселей. Уменьшение размеров индуктивных элементов и емкостных фильтров обеспечивается выбором относительно высоких частот преобразования (200–500 кГц), при которых обеспечиваются минимальные потери в силовых ключах.

Детально схемы подобных мостовых радиационно-стойких преобразователей повышенной мощности рассмотрены в работах [2–3]. Однако эти преобразователи выполнены на многослойной печатной плате, размещаются в корпусе и герметизируются компаундом.

Внешний вид конструкции преобразователя гибридно-пленочного преобразователя (с открытой крышкой) для работы от бортовой сети с напряжением 42 В представлен на рис. 2. В этом модуле, построенном по двухтактной мостовой структуре, в качестве силовых MOSFET выбран радиационно-стойкий N-канальный транзистор с пробивным напряжением V_{DSS} = 100 В, током через открытый канал 33 А, сопротивлением канала в открытом состоянии $R_{DS(ON)}$ = 44 мОм и суммарным зарядом затвора Q_g = 71 нКл. КПД преобразования составляет 90%. Дальнейшее повышение КПД преобразователей можно осуществить заменой кремниевых MOSFET широкозонными нитрид-галлиевыми (GaN) транзисторами с высокой подвижностью электронов, которые обладают намного меньшим зарядом затвора, отличаются высокой скоростью переключения, повышенной рабочей температурой и меньшим напряжением на затворе, что, однако, накладывает повышенные требования к системе управления. В настоящее время многие компании производят специализированные драйверы затворов для управления GaN-транзисторами. В последние годы наблюдается тенденция к использованию GaN-транзисторов в источниках питания космического назначения с целью повышения КПД, уменьшения габаритов, снижения рассеиваемой тепловой мощности и, как следствие, повышения надежности. Примером служит ряд 400-Вт радиационно-стойких DC/DC-преобразователей напряжения се-

Рис. 1. Внешний вид низкопрофильного 430-Вт преобразователя напряжения HDCD/42-28-430/SP с удельной объемной мощностью 6969 Вт/дм^3

Рис. 2. Конструкция низкопрофильного гибридно-пленочного преобразователя напряжения повышенной мощности с явно выраженной плоской формой со снятой крышкой (промежуточный макетный образец)

рии SGRB120, предназначенных для бортовых сетей телекоммуникационных спутников с напряжением сети 100 В. Применение GaN-транзисторов в двухтактной мостовой схеме со сдвигом фазы обеспечило КПД = 92,5% [4]. В 2025 г. несколько известных американских компаний заявили о начале производства серийных радиационно-стойких DC/DC-преобразователей, выполненных по гибридной технологии, в которых в качестве силовых ключей используются GaN-транзисторы. Например, максимальное значение КПД радиационно-стойкого 50-Вт преобразователя напряжения при 50-% нагрузке достигает 93%. Нитрид-галлиевая технология постепенно начинает доминировать благодаря преимуществам в производительности, плотности мощности, габаритах и термостабильности не только в гражданских применениях, но и в космическом и военном секторе.

Основные технические параметры разработанных предприятием модулей с повышенной мощностью (до 600 Вт макс.) приведены в табл. 1.

Представленные одноканальные радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи напряжения преобразуют напряжение питания бортовых 28-, 42-и 100-В сетей к режимам необходимым для работы функциональной части аппаратуры, выполняя гальваническую развязку входа от выхода и корпуса прибора и обеспечивая повышение мощности до 600 Вт в сосредоточенной нагрузке.

Одним из достоинств предлагаемых изделий, выполненных по гибридно-пленочной технологии, является небольшой вес, что продиктовано высокой ценой вывода единицы массы полезной нагрузки на околоземную орбиту.

Из табл. 1 видно, что вес модулей находится в диапазоне 150–250 г.

К примеру, вес 500-Вт радиационностойкого преобразователя класса DC/DC, предназначенного для радиоэлектронной аппаратуры специального назначения, выполненного с использованием технологии печатного монтажа и заливки герметизирующим и теплопроводящим компаундом, составляет 2,3 кг при габаритных размерах 290×144×40 мм. Гибридно-пленочный 600-Вт модуль HDCD/42-28-600/SP имеет вес 250 г, а размеры его корпуса составляют 104,9×55,2×14,50 мм. Удельная объемная мощность соответствует значению 7146 Вт/дм^3, что является хорошим показателем для радиационно-стойких моделей и свидетельствует о высоком уровне миниатюризации.

Заметим, что высота корпуса этого гибридного модуля меньше в 2,75 раза высоты модуля, выполненного по технологии печатного монтажа. Снижение профиля преобразователя при увеличении энергетической плотности DC/DC-преобразователя необходимо во избежание увеличения концентрации тепловой энергии на основании преобразователя. Плоская конструкция модуля, созданного по гибридной технологии, обеспечивает достаточно большую поверхность охлаждения, а установка конструкций на металл является простым решением задачи по отводу тепла.

Для безопасной эксплуатации и расширения возможностей их практического использования модули оснащены набором сервисных и защитных функций. Интегрирована схема блокировки при пониженных напряжениях на входе, защита от короткого замыкания и перегрузки по току; при этом защиты являются самовосстанавливающимися. После устранения причины короткого замыкания модуль автоматически запускается в режиме плавного запуска.

Функция выключения внешним сигналом со стороны входа и выхода (выводы INH1 и INH2) повышает гибкость применения преобразователей в бортовой системе электропитания за счет реализации определенного алгоритма подачи напряжения к отдельным узлам функциональной части аппаратуры. Вопросы использования и организации интерфейса входов выключения внешним сигналом в гибридно-пленочных модулях подробно рассмотрены в [5].

Функция регулировки выходного напряжения (HIX31S28, HCDC/42-5-150/SP, HDCD/100-5-150/SP, HDCD/42-12-200/SP, HDCD/100-12-200/SP) обеспечивает нестандартные значения напряжения подключением внешнего регулировочного резистора между выводом TRIM и общим проводом или выводом выходного напряжения в зависимости от требуемого направления регулировки. Общий диапазон регулирования напряжения не превышает ±10% от номинального значения. При параллельном соединении двух модулей (модели HDCD/42-28-350/SP, HDCD/42-24-350/SP, HDCD/100-28-350/SP, HDCD/100-24-350/SP, HDCD/28-28-350/SP) для работы на общую нагрузку функция выравнивания выходных токов осуществляет равномерное распределение тока между модулями. Выносная обратная связь обеспечивает стабилизацию напряжения непосредственно на выводах нагрузки. Некоторые модули, например HDCD/100-28R-350/SP, имеют вывод вспомогательного источника питания для служебных функций.

Модули испытывались на стойкость к воздействию ионизирующих излучений. Гарантируется стойкость к эффекту полной накопленной дозы не менее 100 крад (Si). Оценка дозовых эффектов проводилась воздействием низкоинтенсивного излучения с мощностью дозы 0,1 рад (Si)/с. Испытания проводились на гамма-установке. В качестве источника ионизирующего излучения использовалось гамма-излучение изотопа ^{60}Co.

Стойкость к одиночным эффектам гарантируется при воздействии заряженных частиц с пороговыми линейными потерями энергии (ЛПЭ) ≥ 75 МэВ·см^2/мг. Критерием обратимого отказа SET является переходная ионизационная реакция в виде изменения выходного напряжения ≥ ±10% при минимальной длительности импульса ≥ 5 мс. Испытания

Таблица 1. Основные технические характеристики радиационно-стойких гибридно-пленочных DC/DC-преобразователей с выходной мощностью 350–600 Вт для бортовых сетей КА с разными номинальными напряжениями

Модель	Входное напряжение, В	Выходное напряжение, В	Выходная мощность, Вт	КПД, %	Пульсация выходного напряжения, мВ	Габариты, мм	Вес, г
HDCD/28-28-350/SP	20~36	28	350	89	150	90,5×50,5×13,50	150
HDCD/42-28R-350/SP	34~50	28	350	90	150	90,5×50,5×13,50	150
HDCD/42-28-350/SP	30~50	28	350	90	150	90,5×50,5×13,50	150
HDCD/42-24-350/SP	30~50	24	350	90	150	90,5×50,5×13,50	150
HIX31S28	25~36	31	350	88	200	90,5×50,5×13,65	155
HDCD/42-28-430/SP	33~50	28	430	90	150	90,5×50,5×13,50	150
HDCD/42-12-360/SP	33~50	12	360	90	150	90,5×50,5×13,50	150
HDCD/100-28-400/SP	80~120	28	400	90	150	90,5×50,5×13,50	150
HDCD/42-28-600/SP	33~50	28	600	90	150	104,9×55,2×14,50	250
HDCD/42-12-480/SP	33~50	12	480	90	150	104,9×55,2×14,50	250
HDCD/42-12R-480/SP	34~50	12	480	90	150	104,9×55,2×14,50	250

модулей на воздействие отдельных заряженных частиц проводились на базе циклотрона. Облучение осуществлялось ионами тантала ^{181}Ta с длиной свободного пробега в кремнии 116,6 мкм, полной энергией 2005,5 МэВ. Интегральный поток (флюенс) ионизирующих частиц составил 10^7 частиц/см^2. Предельный уровень радиационной стойкости позволяет применять модули в бортовой аппаратуре КА на разных орбитах в течение продолжительного времени.

Подробнее о методах испытаний преобразователей напряжения на стойкость к воздействию ионизирующих излучений по дозовым и одиночным эффектам см. [6].

На завершающем этапе производства каждое изделие проходит многоступенчатый выходной контроль, направленный на выявление потенциально ненадежных экземпляров.

Проверочные испытания выполняются по методикам национального стандарта GJB2438B-2017 «Общая спецификация производства гибридно-пленочных микросхем», который соответствует американскому стандарту MIL-PRF-38534F Hybrid Microcircuits, General Specification For. Комплекс проверок включает:

- визуальный внутренний контроль (выполняется перед герметизацией) (метод 2010);
- проверку на наличие малых и больших течей (герметичность, метод 1014);
- контроль содержания паров воды внутри корпуса (метод 1018);
- PIND-контроль (Particle Impact Noise Detection Test): контроль свободно перемещающихся частиц внутри корпуса гибридной схемы по уровню шума (метод 2020);
- испытания на постоянное ускорение (с использованием центрифуги) (метод 2001);
- термоциклирование (метод 1010);
- обработка в стабилизационной печи (метод 1008);
- электротермотренировка (метод 1015);
- проверку критических электрических параметров при крайних температурах;
- рентгеновский радиографический контроль.

Методы испытаний на долговечность и контроль качества изделий в процессе производства детально рассмотрены в [6].

Далее приведены эксплуатационные параметры наиболее востребованных 350-Вт моделей HDCD/100-24-350/SP и HDCD/100-28-350/SP. Детальные электрические параметры модуля HDCD/100-28-350/SP приведены в табл. 2. Полнота приведенных данных позволяет потребителю осознанно выбрать устройство для применения в своей аппаратуре.

Абсолютные максимальные значения параметров модулей HDCD/100-24-350/SP и HDCD/100-28-350/SP:

- входное напряжение V_I: 0~130 В (HDCD/100-24-350/SP, HDCD/100-28-350/SP);
- выходная мощность P_O: 360 Вт;
- температура хранения T_{stg}: –65~150°C;
- температура пайки выводов T_h: 300°C (10 с).

Рекомендуемые условия эксплуатации:

- входное напряжение V_I: 70~120 В (HDCD/100-24-350/SP, HDCD/100-28-350/SP);
- выходной ток I_O: 1,46~14,58 А (HDCD/100-24-350/SP), 1,25~12,5 А (HDCD/100-28-350/SP);
- диапазон рабочих температур (на основании корпуса) T_C: –55~125°C.

Для снижения уровня кондуктивных электромагнитных помех на входных линиях преобразователя применяется двухзвенный LC-

Таблица 2. Электрические параметры DC/DC-преобразователя HDCD/100-28-350/SP

Параметр	Обозначение	Режим измерения (если не указано иное, –55°C≤T_C≤125°C, входное напряжение 70 В ≤V_I ≤120 В, INH не используется, C_L = 0)	Минимальное значение	Максимальное значение	Единица измерения
Выходное напряжение	V_O	V_I = 100 В, I_O = 12,5 А	27,72	28,28	В
Выходной ток	I_O	V_I = 70, 100, 120 В	-	12,5	А
Пульсация выходного напряжения (от пика до пика)	V_g	V_I = 100 В, ширина полосы пропускания BW = 20 МГц, I_O = 12,5А	-	280	мВ
Переходное отклонение при скачке входного напряжения	S_V	V_I = 70 → 120 В, I_O = 12,5 А	-	200	мВ
Переходное отклонение при скачке тока нагрузки	S_I	V_I = 100 В, I_O = 0 А → 12,5 А	-	420	мВ
Входной ток	I_{IN}	V_I = 100 В, I_O = 12,5 А	-	30	мА
Частота преобразования	f_S	T_C = 25°C, V_I = 100 В, I_O = 12,5А	300	500	кГц
КПД	η	V_I = 100 В, I_O = 12,5 А	-	89	%
Рассеиваемая мощность при коротком замыкании на выходе	P_D	T_C = 25°C, V_I = 100 В, КЗ нагрузки	-	60	Вт
Емкостная нагрузка	C_L	T_C = 25°C, V_I = 100 В, не оказывает влияние на параметры постоянного установившегося напряжения	-	5000	мкФ
Электрическое сопротивление изоляции	R_{ISO}	T_C = 25°C, испытательное напряжение 500 В между входными и выходными клеммами, а также между любой входной клеммой и корпусом	100	-	МОм
Изменение выходного напряжения при скачкообразном изменении выходного тока	V_{ROR}	T_C = 25°C, V_I = 100 В, 50-% нагрузка → полная нагрузка или полная нагрузка → 50-% нагрузка, 10-% нагрузка → 50-% нагрузка или 50-% нагрузка → 10-% нагрузка	–2800	2800	мВ
Время переходного процесса к установившемуся значению при скачке тока нагрузки	t_{ROR}	T_C = 25°C, V_I = 100 В, 50-% нагрузка → полная нагрузка или полная нагрузка → 50-% нагрузка, 10-% нагрузка → 50-% нагрузка или полная нагрузка → 50-% нагрузка	-	2000	мкс
Переходное отклонение выходного напряжения (пик.) при изменении входного напряжения	V_{VOR}	T_C = 25°C, входное напряжение V_I = 70 В → 120 В, I_O =12,5 А, входное напряжение V_I = 120 В → 70 В, I_O = 12,5 А	–2800	2800	мВ
Время установления выходного напряжения при скачкообразном изменении входного напряжения	t_{VOR}	T_C = 25°C, входное напряжение V_i: 70 В → 120 В, I_O = 12,5 А, входное напряжение V_i: 120 В → 70 В, I_O = 12,5 А	-	2000	мкс
Перерегулирование при запуске	V_{IO}	входное напряжение V_i: 0 → 100 В, I_O = 12,5 А	-	280	мВ
Задержка запуска	t_{TR}	входное напряжение V_i: 0 → 100 В, I_O = 12,5 А	-	50	мс
Время установления выходного напряжения после снятия КЗ	t_{LF}	T_C = 25°C, V_I = 100 В, I_O: 0–12,5 А	-	50	мс

фильтр. Для соответствия более высоким требованиям к уровню радиопомех на подводящих проводниках к 350-Вт модулям с входным напряжением 28 В рекомендуется применять внешний фильтр HFME/(20-50)-461-750 с коэффициентом ослабления помех 66,8 дБ на частоте 500 кГц.

В завершение раздела приведем технические параметры наиболее востребованного 350-Вт модуля HIX31S28 для бортовых сетей КА с номинальным напряжением 28 В. Подробные параметры (табл. 3) приводятся для демонстрации соответствия электрических характеристик модулей и вспомогательного функционала требованиям к устройствам данного класса, предназначенными для работы в БА КА.

Основные эксплуатационные параметры DC/DC-модуля электропитания HIX31S28

Абсолютные максимальные значения параметров модуля HIX31S28:

- входное напряжение V_I: 0~40 В;
- выходная мощность P_O: 385 Вт;
- температура хранения T_{stg}: –65~150°C;
- температура пайки выводов T_h: 300°C (10 с).
- Рекомендуемые условия эксплуатации:
- входное напряжение V_I: 25~36 В;
- выходной ток I_O: 1,25~12,5 А;
- диапазон рабочих температур (по основанию корпуса) T_C: –55~125°C.

Краткое представление 200-и 350-Вт DC/DC-модулей электропитания предприятия XMTI

Российским специалистам, занимающимся разработкой ракетно-космической и специальной техники, предприятие XMTI известно как крупный производитель полупроводниковой памяти космического и специального назначения. Предприятие серийно производит полупроводниковую память космического назначения 4-го поколения DDR4 и 5-го поколения DDR5. Производится многослойная высокоплотная 3D-память по технологии Package-on-Package.

Предприятие разрабатывает и производит радиационно-стойкие транзисторы, диоды, цифровые (ПЛИС, цифровые сигнальные процессоры, микропроцессоры и т.д.) и аналоговые микросхемы (операционные усилители, компараторы, источники опорного напряжения, ШИМ-контроллеры, линейные регуляторы с небольшим падением напряжения на регулирующем элементе и т.д.), а также широкую гамму гибридно-пленочных DC/DC-преобразователей для авиакосмической электроники. Совмещение разработки кристаллов микросхем, транзисторов, диодов и гибридных микросхем на одном предприятии гарантирует ускорение создания изделий и высокое качество готовой продукции.

Преобразователи напряжения изготавливаются по толстопленочной гибридной технологии. Применение технологии монтажа бескорпусных микросхем, полупроводниковых элементов и конструктивное оформление в цельнометаллическом герметизированном корпусе обеспечивают преимущества в небольших размерах и весе, высокой надежности и высокой радиационной стойкости. Охватываются уровни качества H, YC и YB.

Изделия предприятия применяются во многих космических программах, в которых используются спутники связи, спутники дистанционного зондирования Земли, навигационные спутники, космические станции и т.д. Долговременная орбитальная полетная практика подтверждает стабильность и надежность продукции предприятия.

Специалистам XMTI также удалось решить проблемы изготовления керамических подложек для гибридных изделий с выходными мощностями более 120 Вт, увеличить отвод тепла, обеспечить высокую механическую прочность и жесткость конструкции. В результате освоено производство высокоэффективных радиационно-стойких гибридно-пленочных DC/DC-модулей электропитания с выходными мощностями 200 и 350 Вт для работы в диапазонах напряжений 20~36 В,

Таблица 3. Электрические характеристики 350-Вт DC/DC-преобразователя HIX31S28

Параметр	Обозначение	Режим измерения (если не указано иное, –55°C≤ T_C≤125°C, входное напряжение: 31 ±0,3 В, вход INH не используется, C_L = 0)	Минимальное значение	Максимальное значение	Единица измерения
Выходное напряжение	V_O	I_O = 12,5 А	27,72	28,28	В
Выходной ток	I_O	V_I = 25~36 В	–	12,5	А
Пульсация выходного напряжения (пик–пик)	V_R	ширина полосы пропускания BW = 10 кГц~20 МГц, I_O =12,5 А	–	200	мВ
Переходное отклонение при скачкообразном изменении входного напряжения	S_V	V_I = 25 → 36 В, I_O =12,5 А	–	280	мВ
Переходное отклонение при скачкообразном изменении выходного тока	S_I	I_O = 0 → 12,5 А	–	280	мВ
Входной ток	I_{IN}	полная нагрузка, вывод INH2 подключен к выходной земле	-	50	мА
Рабочая частота	f_S	I_O = 12,5 А	150	250	кГц
КПД	η	I_O = 12,5 А	88	-	%
Рассеиваемая мощность в режиме КЗ	P_D	КЗ нагрузки	-	50	Вт
Емкостная нагрузка	C_L	T = 25°C, не влияет на установившееся значение выходного напряжения	-	1000	мкФ
Электрическое сопротивление изоляции	R_{ISO}	T = 25°C, напряжение 500 В между входным и выходным выводом и между каждым выводом и корпусом	100	-	МОм
Изменение выходного напряжения (пик.) при скачке тока нагрузки	V_{LOR}	T = 25°C, 50-% нагрузка → полная нагрузка или полная нагрузка → 50-% нагрузка T = 25°C, 10-% нагрузка → 50-% нагрузка или 50-% нагрузка → 10-% нагрузка	–1680	1680	мВ
Время переходного процесса к установившемуся значению при скачке тока нагрузки	t_{LOR}	T = 25°C, 50-% нагрузка → полная нагрузка или полная нагрузка → 50-% нагрузка T = 25°C, 10-% нагрузка → 50-% нагрузка или 50-% нагрузка → 10-% нагрузка	-	5000	мкс
Перерегулирование при запуске	V_{TO}	входное напряжение V_I: 0 → 31 В, I_O =12,5 А	-	500	мВ
Время установления выходного напряжения	t_{TR}	входное напряжение V_I: 0 → 31 В, I_O = 12,5 А	10	30	мс
Время установления выходного напряжения после снятия КЗ	t_{LF}	T_A = 25°C, I_{OI}: от КЗ до 12,5А	-	30	мс
Порог срабатывания защиты от КЗ	I_L	T_A = 25°C, V_I = 31 В, защита от перегрузки по току	14,4	-	А
Пределы регулировки выходного напряжения	V_{trim}	снижение выходного напряжения до 90% относительно полного значения; повышение выходного напряжения до 110% относительно полного значения	25,2	30,8	В

Таблица 4. Состав и основные технические характеристики радиационно-стойких гибридно-пленочных DC/DC-преобразователей с выходными мощностями до 350 Вт и рекомендуемые модули фильтрации помех для установки на входе преобразователей напряжения

Модель	Выходная мощность, Вт	Входное напряжение, В	Выходное напряжение, В	Выходной ток, А	КПД (тип.), %	Рекомендуемый фильтр ЭМП	Масса, г	Габариты, мм	Уровень качества
LDC/D28-5-200H/SP	200	20~36	5	40	87	LFE/(20-50)-461-750	130	90,2×50,4×13,8	H
LDCD/28-12-350H/SP	350	20~36	12	29,2	89	LFE/(20-50)-461-750	130	90,2×50,4×13,8	H
LDCD/28-28-350H/SP	350	20~36	28	12,5	91	LFE/(20-50)-461-750	130	90,2×50,4×13,8	H
LDCD/42-5-200H/SP	200	34~50	5	40	88	LFE/(20-50)-461-750	130	90,2×50,4×13,8	H
LDCD/42-12-350H/SP	350	34~50	12	29,2	90	LFE/(20-50)-461-750	130	90,2×50,4×13,8	H
LDCD/42-28-350H/SP	350	34~50	28	12,5	91	LFE/(20–50)-461-750	130	90,2×50,4×13,8	H
LDCD/100-5-200H/SP	200	70–120	5	40	89	LFE/100-461-1000	130	90,2×50,4×13,8	H
LDCD/100-12-350H/SP	350	70~120	12	29,2	91	LFE/100-461-1000	130	90,2×50,4×13,8	H
LDCD/100-20-350H/SP	350	70~120	20	17,5	92	LFE/100-461-1000	130	90,2×50,4×13,8	H
LDCD/100-28-350H/SP	350	70~120	28	12,5	92	LFE/100-461-1000	130	90,2×50,4×13,8	H

34~50 В, 70~120 В. Основные параметры модулей приведены в табл. 4, в которой также указаны модели помехоподавляющих фильтров для дальнейшего снижения уровня кондуктивных помех на входных подводящих проводниках.

Показатель удельной объемной мощности 350-Вт моделей соответствует значению 5579 Вт/дм^3 при максимальном КПД = 92%. Модули выполнены в объеме, который полностью определяется необходимой поверхностью охлаждения. Плоская конструкция модулей обеспечивает достаточно большую поверхность охлаждения.

Внешний вид конструкции 350-Вт модуля LDCD/28-12-350H/SP показан на рис. 3.

Выходной контроль качества преобразователей осуществляется по методикам национального стандарта GJB2438B-2017 «Общая спецификация производства гибридно-пленочных микросхем».

Расчетное среднее время наработки до отказа модулей составляет14000·10^4 ч (при температуре корпуса 35°C, в условиях орбитального полета).

В процессе разработки модули испытываются на стойкость к воздействию ионизирующих излучений. Гарантируется стойкость к эффекту полной накопленной дозы не менее 100 крад (Si). Оценка дозовых эффектов проводится при небольших мощностях дозы 0,01 рад (Si)/с до накопленной дозы 30 крад (Si) и 0,1 рад (Si)/с до накопленной дозы 70 крад (Si). Испытания облучением низкой интенсивности обеспечивают радиационный отклик полупроводниковых приборов максимально приближенным к радиационному отклику, возникающему при облучении на орбите.

Рис. 3. Внешний вид конструкции высокоэффективного радиационно-стойкого 350-Вт DC/DC-модуля электропитания LDCD/28-12-350H/SP

Стойкость к одиночным эффектам гарантируется при воздействии заряженных частиц с пороговыми линейными потерями энергии (ЛПЭ) ≥ 75 МэВ·см^2/мг: не проявляются обратимые и необратимые (катастрофические) одиночные эффекты. Испытания на стойкость к одиночным эффектам выполняются с использованием целого спектра воздействующих ионов – с набором характеристик ЛПЭ ионов эти испытания дают гарантию того, что прошедшие их устройства соответствуют своим спецификациям.

Таким образом, модули годятся для применения в бортовой аппаратуре спутников на разных орбитах.

В настоящее время 350-Вт модули предприятия поставляются исключительно на внутренний рынок для применения в аппаратуре тяжелых телекоммуникационных космических аппаратов и спутников специального назначения.

Выводы

К настоящему времени только две компании китайской авиакосмической отрасли производят радиационно-стойкие гибридно-пленочные DC/DC-преобразователи с выходными мощностями 350–600 Вт, сочетая в себе высокую удельную объемную мощность, низкий профиль, небольшой вес с предельной повышенной рабочей температурой корпуса 125°C. Применение этих модулей позволяет уменьшить соотношение объема и веса источников вторичного электропитания к объему и весу всей электронной части бортовой аппаратуры. Применяемая совершенная элементная база и проверенная в многочисленных проектах структура обеспечивают надежное функционирование в условиях космического пространства. Осуществление состава и последовательности испытаний оговоренными национальными военными стандартами с целью выявления потенциально ненадежных изделий позволяет значительно повысить надежность продукции. Наличие комплекта защитных и вспомогательных функций обеспечивает соответствие требованиям к источникам вторичного электропитания, предназначенным для работы в составе систем энергоснабжения космических аппаратов и спутников.

Вероятно, новые изделия заинтересуют предприятия российского космического приборостроения, производящие ракетно-космическую технику, так как для обеспечения успешности проекта необходимо сотрудничать только с теми производителями компонентов, которые хорошо зарекомендовали себя за многие годы работы.

Литература

1. Виноградов Б. А., Костюков Н. С., Харичева Д. Л. Герметичные металлокерамические соединения. М. Наука. 2004.
2. Перссон М., Петерсен С., Содерберг Б. Эффективный DC/DC-преобразователь с низким выходным напряжением для бортовых резервированных систем обработки данных. Компоненты и технологии. №1. 2020.
3. Попп Э., Содерберг Б. Простая модернизация DC/DC-преобразователя для применения в космической аппаратуре заменой радиационно стойких MOSFET-транзисторов. Компоненты и технологии. №12. 2020.
4. Жданкин В. Высокоэффективные радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи повышенной мощности на основе нитрид-галлиевых транзисторов. Современная электроника. №9. 2025.
5. Жданкин В. Дистанционное управление и внешняя синхронизация преобразователей напряжения. Компоненты и технологии. №5. 2017.
6. Жданкин В. Гибридно-пленочные DC/DC-преобразователи с предельным уровнем радиационной стойкости для космической отрасли. Часть 2. Электронные компоненты. №3. 2026.