

Твердотельные накопители компании Trident Space&Defense для авиационных, военных и ответственных индустриальных приложений

Компания Trident Space&Defense (с января 2011 г. входит в корпорацию Telecommunication Systems) специализируется на производстве электронных компонентов в сферах, где при работе в критических условиях определяющими являются показатели надежности. К серийной продукции Trident Space&Defense относятся твердотельные накопители информации (SSD), радиационно-стойкие модули памяти и многочиповые сборки по технологии SiP (System in a Package). Разработка, сертификация и изготовление SSD согласованы с нормами военного стандарта MIL-STD-810G, действующего с октября 2008 г. Соответствие этому стандарту предопределило применение SSD в авиации, а также в военных и ответственных индустриальных приложениях. Дополнительные испытания на работу в условиях низких температур (-65°C) подтвердили функциональную работоспособность накопителей Trident Space&Defense. Показательным примером их применения в авиации является успешная реализация задач SSD (объединенных в RAID-массив) по хранению и обработке информации в американских беспилотных летательных аппаратах Global Hawk. В статье рассмотрены технические характеристики и особенности твердотельных накопителей компании Trident Space&Defense.

Юрий КОЧАНОВ,

к. т. н.

kym@nevael.ru

Евгений БИРЮКОВ

bel@nevael.ru

Сергей ВАЛОВ,

к. т. н.

TridentSD@mail.ru

Джеффри ПЕНХАЛИГОН

(Geoffrey PENHALIGON)

geoffrey.penthaligon@tridentds.co.uk

Быстрый рост объемов данных, объективная потребность их высокоскоростной обработки и условия применения определяют требования к носителям информации. Руководствуясь этими факторами, инженеры компании Trident Space&Defense сконструировали SSD, характеристики которых соответствуют решаемым задачам в авиационных, военных и ответственных индустриальных приложениях.

При разработке накопителей были учтены требования нескольких стандартов.

Во-первых, стандарта IPC-A-610 class 3 (Институт печатных схем, Institute of Printed Circuits, IPC), в настоящее время это Ассоциация, объединяющая отрасли электроники (Association Connecting Electronic Industries). IPC-A-610 class 3 определяет критерии качества электронных сборок для аэрокосмических применений.

Во-вторых, военного стандарта MIL-STD-810G, в котором фиксируются руководящие принципы и испытательные методы для определения устойчивости к воздействию естественных неблагоприятных окружаю-

щих явлений на оборудование, используемое в военных или коммерческих целях.

Производственные мощности Trident Space&Defense соответствуют показателям системы менеджмента качества AS 9100 «Требования к разработке и производству продукции для авиакосмической отрасли», что технологически предопределило выполнение требований вышеупомянутых стандартов. Система менеджмента качества AS 9100 разработана на основе ISO 9001 Международной группой по качеству в авиакосмической отрасли (International Aerospace Quality Group) с учетом специфики этой отрасли для обеспечения единства международных требований к безопасности.

Соответствие перечисленным эталонам в области производства обуславливает преимущество SSD Trident Space&Defense:

- Корпус формата 2,5" изготовлен из анодированного алюминиевого сплава и имеет высокие прочностные характеристики (компактная версия Proteus/Proteus Plus BGA выполнена в пластиковом корпусе 31×31 мм).

- В корпусе формата 2,5" предусмотрены восемь точек крепления платы и специальные края для ее надежной фиксации.
- Увеличенная толщина 1,1-мм печатной платы SSD.
- Применение оловянно-свинцового припоя PbSn63 для исключения образования «усов» и уменьшения хрупкости в точках соединений.
- Дополнительное крепление компонентов с выводами BGA специальным компаундом (Ероху) для повышения вибро- и ударопрочности.
- Наличие опций по повышению вибро- и ударопрочности по покрытию электронной сборки силиконовым эластомером (Conformal Coating), приклеиванию корпусов компонентов к плате (Ероху Stacking), заполнению внутренней структуры диска полимерным гелем (Gel Filling) — в этом случае диск герметизирован (за исключением разъема) и выдерживает погружение в жидкость.
- Технические характеристики компонентов дисков соответствуют требованиям воен-



Рис. 1. SSD Galatea в форм-факторе 2,5 дюйма



Рис. 2. SSD Proteus в малогабаритном корпусе



Рис. 3. SSD Proteus Plus PCA бескорпусный

Таблица 2. Количество адресов логических блоков и емкость SSD

Емкость SSD (до форматирования), Гбайт	Количество адресов логических блоков (LBA)	Емкость SSD (после форматирования), Гбайт
32	62 533 296	29,8
64	125 045 424	59,6
128	250 069 680	119,2

Таблица 1. Основные характеристики SSD Trident Space&Defense

Серия SSD	Объем памяти, Гбайт	Тип интерфейса	Скорость чтения/записи	Энергопотребление в режиме чтение/запись, Вт	Методы стирания информации
Proteus Standard 2,5"	32, 64, 128	IDE(PATA)	107/115 Мбайт/с 7800/900 IOPS	1,48/2,05	Standard erase
Proteus Secure 2,5"	32, 64, 128	IDE(PATA)	107/115 Мбайт/с 7800/900 IOPS	1,48/2,05	Standard erase NSA/CSS 9-12 RCC-TG IIRIG 106-07
Proteus Standard BGA	8, 16, 32	IDE(PATA)	42/27 Мбайт/с 40/14 Мбайт/с	0,85/0,9	Standard erase
Proteus Plus Standard 2,5"	32, 64, 128, 256	SATA 2.6	250/205 Мбайт/с 7500/1700 IOPS	1,3/2	Standard erase
Proteus Plus Secure 2,5"	32, 64, 128, 256	SATA 2.6	250/205 Мбайт/с 7500/1700 IOPS	1,3/2	Standard erase NSA/CSS 9-12 RCC-TG IIRIG 106-07
Galatea 2,5"	50, 100, 200, 400	SATA 2.6	260/260 Мбайт/с 30 000/30 000 IOPS	2,6/3	9 вариантов

ного стандарта или промышленному диапазону применения.

- Технические характеристики компонентов имеют увеличенные допуски (например, по питанию ±10%) и пониженные номинальные значения питания.
- Термотрировка SSD при температуре +85 °С (Burn-in, «выжигание дефектов») в течение 8 часов для промышленных версий и 96 часов — для военных применений.

Сейчас компания Trident Space&Defense выпускает SSD следующих серий:

- Proteus (интерфейс IDE, версии Standard/Secure, в корпусе и PCA (Printed Circuit Assembly, бескорпусная версия)),
- Proteus Plus (интерфейс SATA, версии Standard/Secure в корпусе и PCA),
- Galatea объемами до 400 Гбайт в форм-факторе 2,5" (рис. 1).

SSD Proteus в малогабаритном корпусе (с платами по технологии SiP) с выводами BGA показан на рис. 2.

Пример бескорпусного (PCA) исполнения SSD Proteus Plus представлен на (рис. 3).

Основные технические характеристики SSD приведены в таблице 1.

Форматирование SSD в операционной среде WindowsXP несколько уменьшает его полезную емкость, данные приведены в таблице 2.

Серии твердотельных накопителей Proteus Plus Standard и Secure — основные семейства, которые выпускает Trident Space&Defense.

Поэтому авторы приводят описание этих групп с указанием особенностей новой серии Galatea и других перспективных приборов.

Главными компонентами SSD Proteus Plus являются 32-битный контроллер с архитектурой ARM-7, SDRAM кэш-память объемом 64 Мбайт и массивы одноуровневых ячеек памяти SLC NAND Flash.

Инженеры Trident Space&Defense применяли собственные разработки при создании схемы дисков, не основываясь на стандартной схеме (Reference Design) произ-

водителя контроллеров. Например, были применены конденсаторы типоразмера 0603 вместо 0204. Это улучшило температурный коэффициент SSD, дало возможность понизить номинальные напряжения других компонентов и достичь более широких пределов по питанию диска с допуском ±10%.

Функциональная схема SSD показана на рис. 4.

Для серии Proteus Plus скорость передачи данных составляет от 1,5 до 3 Гбит/с, в зависимости от загруженности хост-контроллера. Тесты SSD показали, что скорость передачи данных практически не зависит от емкости накопителей. Если этот показатель имеет значение 3 Гбит/с, то запись и чтение осуществляются на уровне 205 и 250 Мбайт/с соответственно, для SSD с объемом памяти от 64 до 256 Гбайт. В сериях Proteus 2 и Galatea 2, предназначенных к выпуску в 2012 г., предусматривается применение интерфейса SATA 3.0 со скоростью передачи данных до 6 Гбит/с.

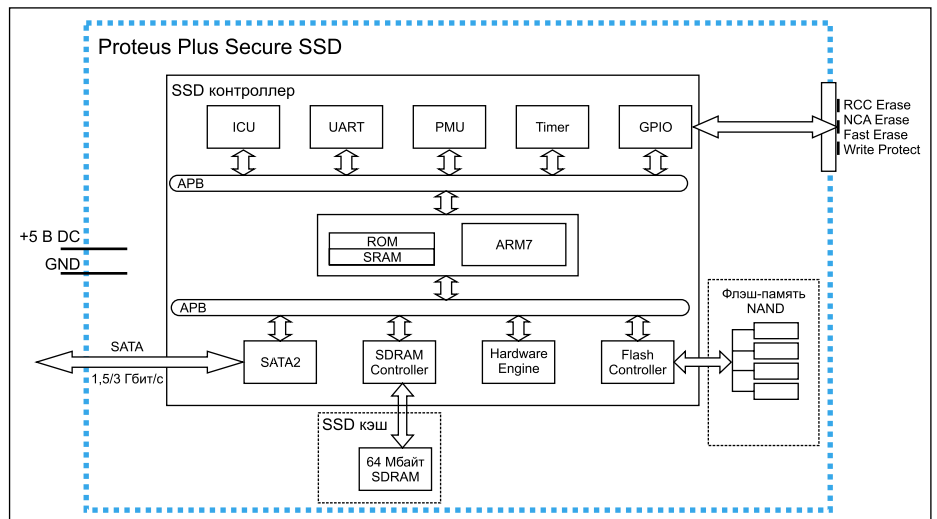


Рис. 4. Функциональная схема SSD Proteus Plus

Запись данных осуществляется блоками по 256 кбайт и количество (гарантированных) циклов запись/стирание ограничено физическими свойствами SLC ячеек на уровне 100 000 операций. Для достижения максимального значения этого показателя в SSD реализованы алгоритмы равномерного распределения уровня деградации ячеек памяти (динамическое и статическое). Динамическое распределение выполняется в процессе обработки данных, в ходе которого время не расходуется на предварительную подготовку — стирание данных из 256 кбайт блока памяти. Контроллер заранее резервирует пул подготовленных к записи блоков, информация из которых предварительно стерта, и использует из состава пула новый блок для записи. Данные из «старого» блока удаляются контроллером в качестве последующей задачи, и блок возвращается в пул, готовый для очередной итерации. Статическое распределение предполагает подсчет количества циклов для каждого блока. Блок с меньшим количеством циклов будет иметь приоритет при выполнении операции стирания/записи.

В SSD реализован постоянно действующий алгоритм обнаружения «дефектных» блоков, с переносом данных в запасные блоки. Технология SMART (Self-Monitoring Analysis and Reporting Technology) позволяет определять количество «дефектных» блоков и вести подсчет ошибок, возникающих при взаимодействии с массивами NAND и интерфейсом SATA. С помощью команд SMART пользователь может определить остаточное количество циклов записи/стирания, «дефектных» блоков и остаток времени функционирования SSD, выраженное в процентном отношении.

Для обеспечения высокой производительности (7500/1700 (чтение/запись) IOPS в серии Proteus Plus и 30 000/30 000 (чтение/запись) IOPS в серии Galatea) и увеличения жизненного цикла в SSD встроена SDRAM кэш-память объемом 64 Мбайт. В целях сокращения количества циклов запись/стирание в кэш-памяти осуществляется последовательное «накапливание» информации по 512 байт до достижения объема блока 256 кбайт для последующих итераций с этим блоком. Кроме того, в SDRAM находятся метаданные (сведения о данных), что позволяет контроллеру SSD осуществлять логическую/физическую адресацию, не обращаясь каждый раз к NAND Flash-массиву. Метаданные резервируются в NAND Flash и в случае отключения питания — сохраняются, с последующим восстановлением в SDRAM при возобновлении питания. Увеличению производительности SSD способствует реализация в кэш-памяти алгоритма «угадывания» (опережающей загрузки, look ahead caching). Логика алгоритма построена на предположении, что данные из оперативной памяти обрабатываются последова-

тельно, в порядке возрастания адресов. Кэш-контроллер, обрабатывая запрос на чтение 512 байт логических блоков, загружает и следующие за ними блоки (по 4 кбайт — размерность страницы). При условии, что данные действительно обрабатываются последовательно, остальные запросы процессора будут выполнены практически мгновенно, поскольку запрошенные ячейки уже присутствуют в кэш-памяти. Следует заметить, что стратегия опережающей загрузки возникает уже в силу необходимости согласования очередности оперативной памяти и процессора.

Испытания твердотельных накопителей показали, что со временем происходит фрагментация SSD: постранично записанные данные находятся в разных областях NAND Flash массивов и создается недостаток свободных последовательных блоков SSD, что существенно ухудшает показатели производительности диска. Процессы фрагментации различаются в зависимости от того, в какой операционной системе функционирует накопитель. В среде Windows XP обратная процедура — дефрагментация — востребована достаточно часто (здесь применяется правило «Если более 20% дискового пространства фрагментировано, то нужно выполнять дефрагментацию»). Операционные системы Linux, Vista и Windows 7 не требуют частой дефрагментации, реализация которой влияет на прогнозируемый ресурс SSD вследствие выполнения множества циклов перезаписи блоков. Поэтому применение этой процедуры к SSD не рекомендуется. Как альтернатива дефрагментации, Proteus Plus использует преимущества встроенной кэш-памяти и команды TRIM. TRIM поддерживается операционными системами Linux, BSD, Windows 7, Windows XP, оптимизирует характеристики фрагментированного SSD и уменьшает влияние «сборки мусора» — специального кода, освобождающего память путем удаления объектов, которые не будут востребованы приложением.

Инженеры Trident Space&Defense провели испытания для определения эффективности TRIM. Диск был фрагментирован без применения этой команды в результате 15 циклов перезаписи информации на всем свободном пространстве. После этого SSD проверили на скорость чтения/записи информации. По сравнению с «чистым» диском скорость чтения уменьшилась на 33%, а скорость записи — на 77%. После выполнения команды TRIM значения показателей чтения/записи информации восстановились на уровне, изначально заявленном для Proteus Plus (отличие незначительное, менее 1%).

Встроенный алгоритм кода циклической избыточной проверки CRC позволяет определять одиночные и двойные ошибки, ошибки в нечетном числе битов, а код коррекции ошибок ECC — исправить до 6 байтов в 512-байтовом секторе данных. Вероятность появления бита ошибки для SSD Proteus Plus

составляет не более 1 на 10^{14} бит и является функцией степени полиномиального кода ECC, применяемого контроллером (для серии Galatea этот показатель лучше — не более 1 на 10^{16} бит).

Среднее время наработки на отказ (MTBF) составило 1,24 млн часов. Расчет производился по методу «Telcordia method 1, case 2», что предполагает построение модели функционирования диска на основе статистических данных, полученных как в результате тестовых испытаний, так и в ходе эксплуатации от заказчиков. Обязательным условием при тестах было нахождение диска под питанием, без времени простоя (100%-ная программная нагрузка).

Выбор режимов стирания или защиты от записи SSD осуществляется программным способом с помощью ATA команд, утилитами или механически — джамперами. Для индикации наличия питания предусмотрен зеленый светодиод, при выполнении операции стирания загорается синий светодиод (светодиоды встроены в тыльную часть корпуса диска).

Напряжение питания диска составляет +5 В постоянного тока с погрешностью $\pm 10\%$ и допустимой пульсацией 250 мВ. Тестовые испытания позволили определить показатели значений тока и мощности в разных режимах работы SSD (данные приведены в табл. 3).

Таблица 3. Показатели значений тока и потребляемой мощности SSD серии Proteus Plus в разных режимах работы

Режим тестирования	Значения тока при U=+5 В DC, мА	Потребляемая мощность, мВт
IDLE Status	85	415
READ 4K Sequential	150	600
READ 4K Random / Sequential	105	525
READ 4K Random	105	525
READ 256K Sequential	237	1185
READ 256K Random / Sequential	205	1025
READ 256K Random	196	980
WRITE 4K Sequential	160	800
WRITE 4K Random / Sequential	162	810
WRITE 4K Random	232	1160
WRITE 256K Sequential	359	1795
WRITE 256K Random / Sequential	373	1865
WRITE 256K Random	373	1855

В SSD серии Galatea предусмотрена функция защиты записи данных при внезапном отключении питания или снижения его менее порогового уровня. В компоновку диска включена электронная схема, работающая по принципу UPS (Uninterruptible Power Supply). Ее ключевыми компонентами являются регулятор напряжения 17,5 В, сборка из 10 танталовых конденсаторов и устройство контроля напряжения. Климатические испытания показали эффективность работы регулятора, танталовых конденсаторов и устройства контроля напряжения в температурном диапазоне, превышающем промышленный (−40...+85 °С). Регулятор

напряжения обеспечивает заряд конденсаторов, а применяемое высокое значение напряжения регулятора (17,5 В) способствует созданию увеличенных запасов энергии конденсаторной сборки. Все вместе позволило уменьшить размеры площади, занимаемой сборкой на плате. Регулятор напряжения работоспособен в широком диапазоне по входу от 3,2 до 25 В.

Устройство контроля напряжения сравнивает значения реального напряжения питания SSD с эталонным (+5 В DC ±10%) и при его изменении на 13% и более инициирует включение резервной схемы, одновременно посылая специальный сигнал Power fail на контроллер диска. Контроллер прекращает прием новых ATA-команд из хоста и выполняет все команды по записи данных, находящихся в кэш-памяти RAM. По завершению записи данных в NAND Flash массив он посылает сигнал о завершении (Power-fail complete) в блок согласования операций. В свою очередь, блок согласования операций вырабатывает сигнал System reset для всей электронной схемы диска. При возобновлении питания SSD начинает функционировать в прежнем порядке.

Испытания дисков на соответствие заявленных характеристик температурному диапазону, термоудару, удару, вибрации, сотрясениям при стрельбе, взрывоопасной атмосфере, низкому и высокому давлению, влажности, грибам, сопротивлению песку, пыли и соляному туману были проведены по MIL-STD-810G. Заявленные технические характеристики SSD совпали с требованиями стандарта в полной мере и приведены в таблице 4.

Однако применение SSD в авиации и военной сфере потребовало дополнительного тестирования на соответствие климатическим условиям в этих областях и, прежде всего, на низкие отрицательные температуры. Такие тесты проведены в климатической камере Trident Space&Defense. Предварительно SSD были изолированы от хоста и в течение двух часов находились в камере при температуре -65 °С. Последовавшие затем циклические испытания при -65 °С и -40 °С подтвердили функциональную работоспособность SSD. Выполнен визуальный тест (при 30-кратном увеличении) точек пайки компонентов, показавший соответствие критериям стандарта IPC-A-610 class 3. На фотографиях показаны точки пайки выводов TSOP, BGA, SATA разъема до и после термоциклирования (рис. 5–7).

Для проверки степени соответствия накопителей Trident Space&Defense отечественным требованиям по устойчивости к окружающим воздействиям были проведены специальные тесты в головном институте радиоэлектронного комплекса России в области надежности, качества, сертификации, стандартизации ЭКБ и РЭА — ОАО РНИИ «Электронстандарт» и ФБУ 46 ЦНИИ МО РФ. Модель внешних воздействующих факто-

Таблица 4. Значения показателей технических характеристик SSD Proteus Plus, по результатам испытаний

Наименование показателя	Наименование характеристики, единица измерения	Значение показателя
Гармоническая вибрация, эквивалентная широкополосной случайной вибрации	Диапазон частот, Гц	20–2000
	Амплитуда ускорения, g	2–16,3
	Время воздействия на каждую ось, с	3600
Ударная прочность при воздействии многократных механических ударов	Пиковое ударное ускорение, g	1500
	Длительность действия ускорения, мс	0,5
	Направление воздействия	3 удара в 6 направлениях
Ударная устойчивость при воздействии многократных механических ударов	Пиковое ударное ускорение, g	40
	Длительность действия ускорения, мс	11
	Направление воздействия	3 удара в 6 направлениях
Акустический шум	Диапазон частот, Гц	125–10 000
	Уровень звукового давления (относительно 2,1–5 Па), дБ	130
Воздействие пониженной температуры среды при эксплуатации	Минимальная пониженная температура среды при эксплуатации, °С	T = -60 °С
	Предельная пониженная температура среды при эксплуатации, °С	T = -65 °С
	Длительность воздействия, с	1800 при каждой T
Воздействие повышенной температуры среды при эксплуатации	Повышенная температура среды при эксплуатации, °С	T = +70 °С
	Повышенная температура среды при эксплуатации, °С	T = +85 °С
	Длительность воздействия, с	1800 при каждой T
Воздействие изменения температуры среды	Минимальное и максимальное изменение температуры среды, °С	Tн = -40 °С Tв = +100 °С
	Количество циклов	10 циклов
Повышенная влажность воздуха	Относительная влажность при температуре +35 °С	95 ± 3
	Длительность воздействия	6 суток
Изменение давления	Диапазон изменения давления, Па (мм рт. ст.)	от 74 670 (560) до Pн от 41 000 (307) до Pн
Атмосферное пониженное давление	Значение при наземной отработке, Па (мм рт. ст.)	12 000 (90)
Атмосферное повышенное давление	Значение при наземной отработке, Па (мм рт. ст.)	1,04 × 10 ⁵ (780)
Изменение давления	Диапазон изменения давления, Па (мм рт. ст.)	От 1,04 × 10 ⁵ (780) до 1,33 × 10 ⁻⁴ (10 ⁻⁹)
	Скорость изменения давления, Па/с	Не более 2,7 × 10 ³
Газовая среда при эксплуатации	Диапазон изменения давления, Па (мм рт. ст.)	От 1,33 × 10 ⁻¹ (10 ⁻³) до 1,33 × 10 ⁻⁷ (10 ⁻⁹)
	Длительность воздействия, лет	7–12,25
Доза ИИ КП	кРад	50
T34 по тиристорному эффекту	МэВ·см ² /мг	45

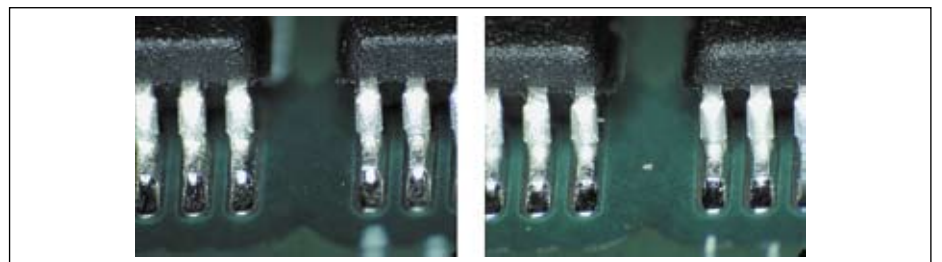


Рис. 5. Точки пайки выводов TSOP до и после термоциклирования

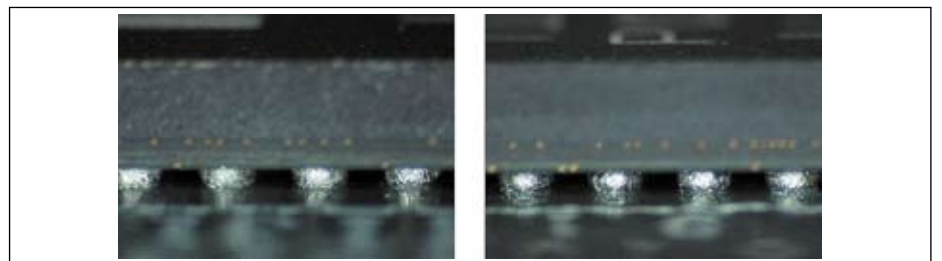


Рис. 6. Точки пайки выводов BGA до и после термоциклирования

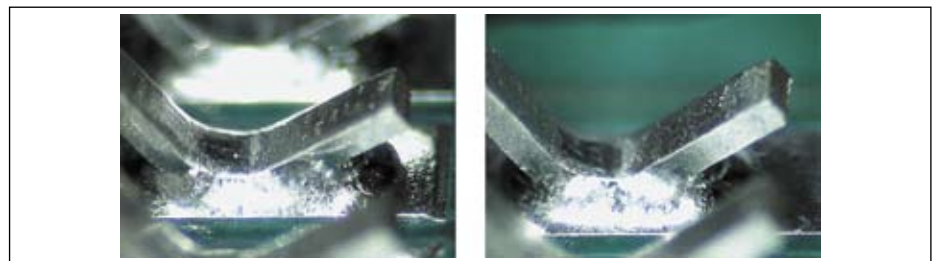


Рис. 7. Точки пайки SATA разъема до и после термоциклирования



Рис. 8. Сертификат системы «Военэлектронсерт»

ров была построена на основе предельных значений характеристик (например, минимальная температура -65°C), схема сертификации 5 «б» по РД В 319 003-97. Результаты испытаний подтвердили значения заявленных параметров SSD (табл. 4), выдан сертификат АНО «НТЦИС «Электронстандарт»» и ФБУ 46 ЦНИИ МО РФ (рис. 7).

В настоящее время твердотельные накопители Trident Space&Defense применяются компаниями, работающими в аэрокосмической и военной сферах, например

Lockheed Martin, Zodiac Aerospace, VT Milpore и QinetiQ. Успешная эксплуатация дисков подтверждена результатами действий беспилотных летательных аппаратов (Unmanned Air Vehicle, UAV, БПЛА) Global Hawk, боевых машин десанта (Airborne Assault Vehicle, AAV) и вертолетов серии H-1 корпуса морской пехоты США. SSD встроены в бортовые регистраторы информации, изготавливаемые корпорацией Zodiac Aerospace для истребителей F/A-18E/F (при модернизации электронного оборудования) ВВС США, по заказу Thales — в истребителях Dassault Rafale и Dassault Mirage 2000 (Франция). Кроме того, накопители используются в бортовых компьютерах танков Leopard 2A7 (Германия, Швейцария). Находят свое применение SSD Trident Space&Defense и в продукции российских компаний в ответственных приложениях. Они не попадают под действие международных правил перевозки вооружений (International Traffic in Arms Regulations, ITAR) и, следовательно, не требуют оформления экспортной лицензии.

Накопленный инженерный потенциал Trident Space&Defense в области схемных решений для твердотельных накопителей позволяет предлагать заказчикам различные конфигурации с требуемыми характеристиками интерфейса; форм-фактора; материала корпуса; функциональных данных: емкости, скорости, варианта питания; диапазона температур; радиационной стойкости.

Как одна из форм увеличения емкости (до 16 Тбайт) и резервирования, SSD Trident Space&Defense в аэрокосмической и военных областях применяются в составе RAID-массивов, в том числе с использованием архитек-

туры Open VPX (например, компании Galleon Embedded Computing AS), с помощью которой на системном уровне определяется совместимость блоков в многомодульных системах и интегрированных средах, а также платформах, содержащих блоки различных производителей. Но это — тема другой статьи.

Объективная постоянная потребность в больших объемах памяти и ее скоростной обработке в ответственных приложениях создает многообразие предложений на рынке накопителей информации, и SSD Trident Space&Defense занимают достойное место в аэрокосмической и военной сферах. ■

Литература

1. Стандарт AS9100. <http://www.bsi-russia.ru/Assessment-and-Certification-services/Management-systems/Standards-and-schemes/AS9100-9110-9120>
2. Руководство пользователя UM-TSDEP25S-B User Manual Proteus Plus Secure SATA SSD.
3. Касперски К. Подсистема кэш-памяти, как она есть — <http://www.insidepro.com/kk/008/008r.shtml>
4. Определение MTBF по Telcordia — http://www.reliasoft.com/newsletter/v9i1/prediction_methods.htm
5. Технический бюллетень ТВ-11 от 23 ноября 2010 г. Trident Space&Defense.
6. Сертификат № СВС. 02. № 02.211.0001.11 АНО «НТЦИС «Электронстандарт»» и ФБУ 46 ЦНИИ.
7. www.tridentsd.com/apg/
8. www.galleonembedded.com/
9. Kowal S. Trident Space&Defense. Operational overview: Galatea SSD power-fail safeguard.