

В. В. ФЕДОСОВ, В. И. ОРЛОВ

МИНИМАЛЬНО НЕОБХОДИМЫЙ ОБЪЕМ ИСПЫТАНИЙ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ НА ЭТАПЕ ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ

Определен минимально необходимый объем отбраковочных испытаний изделий микроэлектроники для космических аппаратов. Предложенный подход позволяет минимизировать затраты на проведение испытаний, реализация которых способствует обеспечению надежности функционирования аппаратуры и КА в целом.

Ключевые слова: электрорадиоизделия, дополнительные отбраковочные испытания, разрушающий физический анализ, электротермотренировка.

В России отсутствуют специализированные производства электрорадиоизделий (ЭРИ) для космической отрасли, требования к качеству которых чрезвычайно высоки. Основное требование заключается в необходимости обеспечения их длительной непрерывной работоспособности в течение 10—15 лет активного существования космического аппарата (КА). Учитывая, что в партиях изделий, поступающих к изготовителю аппаратуры, всегда содержатся ЭРИ с дефектами (потенциально ненадежные), на стадии входного контроля необходимо выявить такие изделия и не допустить их к установке в аппаратуру.

Одним из наиболее эффективных методов предотвращения отказов аппаратуры являются дополнительные отбраковочные испытания и разрушающий физический анализ (РФА) [1]. Суть метода состоит в том, что потенциально ненадежные ЭРИ выявляются до момента их отказа.

В настоящее время общепринятыми считаются два направления повышения надежности ЭРИ [2]:

- устранение причин отказов за счет совершенствования конструкции изделий и технологии их изготовления;
- выявление и удаление из готовой партии изделий с дефектами до поставки потребителю.

Оба варианта обычно не реализуются, так как поставки осуществляются строго в соответствии с техническими условиями и практически отсутствует обратная связь потребитель — изготовитель. Поэтому используется третий вариант: выявление и удаление из готовой партии изделий с отказами (действительными и потенциальными) при входном контроле на предприятии-потребителе ЭРИ.

Очевидно, что при прогнозировании работоспособности ЭРИ практически невозможно учесть реальный разброс времени наработки на отказ, что связано с разбросом параметров ЭРИ и наличием в структуре изделий дефектов и неоднородностей. Поэтому даже при оптимистических результатах прогноза необходимым условием является научно-обоснованный выбор и введение дополнительных методов отбраковочных испытаний и, в первую очередь, эффективных методов диагностирования ЭРИ до установки их в бортовую аппаратуру. Физические и методологические основы применения методов диагностирования известны [3, 4].

Основными целями разработки программ дополнительных отбраковочных испытаний изделий микроэлектроники являются:

- обеспечение требуемого уровня качества и надежности;
- выявление номенклатуры потенциальных дефектов, генерируемых технологическим процессом;

— выявление эксплуатационных факторов, обуславливающих развитие дефектов и приводящих к отказам.

Необходимый уровень качества и надежности ЭРИ определяется на этапе оценки вероятности безотказной работы аппаратуры. Принципиально задача отбраковки потенциально ненадежных ЭРИ может быть решена двумя путями:

- испытанием в форсированных режимах до начала развития отказа изделия;
- применением диагностического неразрушающего контроля.

Физической основой испытаний в форсированных режимах является различная стойкость потенциально ненадежных и качественных ЭРИ к электрическим, механическим, климатическим и радиационным нагрузкам.

Показатели безотказности являются функцией внутренних параметров (X), формируемых в процессе производства, электрических нагрузок (Y) и условий эксплуатации (Z) аппаратуры. Тогда время безотказной работы можно оценить как $T_0=f(X,Y,Z)$. Так как в процессе эксплуатации электрические и механические нагрузки, а также климатические факторы неизменны для всех элементов партии изделий, то разброс времени наработки на отказ будет полностью определяться внутренними параметрами: $T_0=f(X)$.

Совокупность диагностических методов контроля основана на контроле информативных параметров. При этом предполагается, что отказы обуславливаются деградационными физико-химическими процессами, влияющими на измеряемые параметры.

Отбраковочные испытания базируются на следующих основных принципах:

- форсированная нагрузка не должна приводить к появлению новых механизмов отказов, т. е. должно выполняться условие автоточности механизмов отказов;
- каждый из видов отбраковочных испытаний направлен на активацию лишь определенных типов деградационных процессов.

Физический подход к выбору факторов, влияющих на скорость развития деградационного процесса, предполагает знание закономерностей возникновения и развития отказов. Поэтому при определении условий форсированных испытаний необходимо выбирать факторы, характерные для условий эксплуатации.

Примерный перечень потенциальных дефектов кристаллов интегральных схем (ИС) и видов отбраковочных испытаний, позволяющих выявлять эти дефекты, приведен в работе [5].

Необходимо отметить, что применение в ходе дополнительных испытаний выборочного разрушающего физического анализа позволяет существенно ограничить количество испытаний для выявления отказов, связанных с дефектами кристаллов ИС (например, таких, как загрязнение поверхности, трещина на кристалле, дефекты фотолитографии и др.), и отказов при сборке кристалла в корпусе (например, таких, как разрыв проволочного соединения, дефекты сварки, дефекты посадки кристалла и др.).

На основе проведенных исследований [5] были выделены наиболее распространенные методы отбраковочных испытаний. В табл. 1 приведены данные о среднем уровне отказов ИС при различных видах испытаний.

Таблица 1

Метод испытаний	Процент отбракованных ИС
Измерение электрических параметров	0,32
Термоциклирование	1,08
Тепловой удар	0,67
Выдержка при высокой температуре	0,04
Электротермотренировка	1,19—10,5
Проверка герметичности	6,21

Следует отметить, что в перечнях, приведенных в работе [5] и в табл. 1, содержатся данные, полученные при изготовлении изделий. Однако при входном контроле на предприятии-

потребителе нецелесообразно проводить такие виды испытаний, как термоциклирование и проверка герметичности. В частности, контроль герметичности в процессе изготовления проводят после операции герметизации до нанесения на корпус защитных покрытий [6]. Использование уайт-спирита и последующая промывка могут оказать негативное воздействие на защитные покрытия корпуса и маркировку готовых изделий. Контроль герметичности масс-спектрометрическим методом приводит к ложному бракованию ЭРИ из-за растворения гелия в защитном покрытии.

При изготовлении интегральных схем проводятся 100%-ные отбраковочные испытания, в состав которых включено и испытание на воздействие температуры среды. При приемосдаточных испытаниях на заводе-изготовителе испытания на воздействие температуры среды проводят на выборке изделий, которые не подлежат поставке потребителю [7]. Известно [8], что этот вид испытаний проводится для выявления дефектов корпуса. Так как данные испытания относятся к разрушающим, существует опасность не только повредить элемент и отбраковать его, но, что намного опаснее, — внести дефекты, которые могут проявиться при последующей эксплуатации.

Необходимо особо отметить, что дополнительные отбраковочные испытания — это не повторение испытаний, проводимых на заводе-изготовителе, а испытания, направленные на реализацию повышенных требований к ЭРИ для космической техники.

Таким образом, минимально необходимый объем отбраковочных испытаний должен включать:

- измерение электрических параметров;
- выборочный разрушающий физический анализ;
- испытания на наличие посторонних частиц в объеме изделия;
- электротермотренировку.

Для оценки достаточности мероприятий, проводимых при входном контроле, очень важна информация о надежности ЭРИ. Оперативность получения такой информации по результатам эксплуатации чрезвычайно низка. В этой связи актуальной становится разработка и применение специальных методов прогнозирования надежности ЭРИ. Дополнительные испытания на предприятии-потребителе ЭРИ [1, 9, 10]) позволяют повысить качество партий изделий, предназначенных для установки в бортовую аппаратуру, снизить интенсивность отказов определенного количества (выборки) ЭРИ за счет исключения изделий со скрытыми дефектами, а также оценить коэффициент, уточняющий приводимые в справочных данных значения базовой интенсивности отказов [11]. При этом наиболее эффективным видом испытаний является электротермотренировка (ЭТТ) с обязательной оценкой дрейфа параметров и классификацией изделий по данному признаку [1].

Определив виды дополнительных испытаний, необходимо выбрать и их режимы. Только ЭТТ требует выбора температурного режима испытаний и его продолжительности, причем в зависимости от технологии изготовления и типов изделий микроэлектроники ЭТТ может быть динамической, статической, с обратным напряжением смещения $p-n$ -переходов и др. При выборе температуры ЭТТ следует принимать во внимание коэффициенты ускорения деградационных явлений для различных энергий активации дефектов, а также факт отсутствия достаточно точных количественных оценок коэффициентов ускорения развития потенциальных дефектов. Это связано с недостаточным знанием закономерностей дефектообразования в реальных элементах, а также сложностью и высокой стоимостью экспериментального получения таких оценок [12].

В табл. 2 приведены значения коэффициента (K) ускорения деградационных явлений относительно $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ при различных значениях энергии активации (E).

Таблица 2

Условная температура, °С	K, при E, эВ				
	0,3	0,5	0,8	1,0	1,2
50	2,47	4,51	11,1	20,3	37,1
75	5,35	16,4	87,7	268	8,22
100	10,5	50,1	524	2507	1210
125	18,8	133	2500	1770	1250
150	31,5	315	9920	9910	9880

При определении необходимого объема дополнительных отбраковочных испытаний нельзя не упомянуть о таком критерии, как допустимый процент отказов ЭРИ в проверяемой партии изделий. Данный критерий установлен в программах испытаний для КА различного назначения в разных вариациях (от 0 до 15 %). Применение этого критерия, возможно, оправдано при изготовлении изделий микроэлектроники, так как согласно общим техническим условиям [7] приемосдаточные испытания ИС проводятся на выборке от партии изделий. Учитывая, что отбраковочным испытаниям подвергаются все элементы проверяемой партии (100 %), то определение допустимого процента отказов не имеет физического смысла (не отражает качества изготовления производственной партии) и зависит только от объема закупленной партии ЭРИ.

Итак, определен минимально необходимый состав 100%-ных дополнительных испытаний изделий микроэлектроники для применения в аппаратуре космических аппаратов; при этом учтено, что отбраковочные испытания — это испытания, направленные на реализацию повышенных требований к ЭРИ для космической техники. Предложенный подход позволяет минимизировать затраты на проведение испытаний, так как их объем строго подчинен технической целесообразности.

Реализация дополнительных отбраковочных испытаний ЭРИ при создании КА „SESAT“ [13], первого отечественного КА с гарантируемым (и фактическим на сегодня) сроком активного существования — 10 лет, стала одним из основных факторов обеспечения надежности функционирования аппаратуры и КА в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосов В. В., Патраев В. Е. Повышение надежности радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов при применении электрорадиоизделий, прошедших дополнительные отбраковочные испытания в специализированных испытательных технических центрах // Авиакосмическое приборостроение. 2006. № 10. С. 50—55.
2. Горлов М., Ануфриев Л., Строгонов А. Отбраковочные технологические испытания как средство повышения надежности партий ИС // Chip News. 2001. N 5.
3. РД 11 0682-89. Микросхемы интегральные. Методы неразрушающего контроля диагностических параметров. Введ. с 01.01.90.
4. РД В 22.32.119-89. Методическое пособие по выбору и использованию методов и средств электрофизического диагностирования электрорадиоизделий. 1989.
5. Андреев А. И., Катеринич И. И., Попов В. Д. Надежность и контроль качества интегральных микросхем (конспект лекций) Ч. 2. Контроль качества. М.: МИФИ, 2004. 120 с.
6. ОСТ В 11 0219. Приборы полупроводниковые. Методы технологических (отбраковочных) испытаний. М.: 1985.
7. ОСТ В 11 0998. Микросхемы интегральные. Общие технические условия. М.: 1999.
8. Горлов М. И., Королев С. Ю. Физические основы надежности интегральных схем: Учеб. пособие. Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1995. 200 с.

9. ОТ 510-5608-05. Анализ технического состояния и оценка уровня фактической надежности и готовности к целевому использованию космических аппаратов народно-хозяйственного назначения по результатам изготовления и эксплуатации в 2005 г. Анализ динамики изменения показателей надежности за период с 1994 по 2005 гг. Железногорск, 2005.
10. Данилин Н. С. Информационные технологии и сертификация элементной базы новых российских телекоммуникаций: Учеб. пособие. М., 2000. 47 с.
11. Надежность ЭРИ: Справочник М.: Изд. 22 ЦНИИ МО, 1992; 2000; 2002; 2006.
12. Урличич Ю. М., Данилин Н. С. Управление качеством космической радиоэлектронной аппаратуры в условиях глобальной открытой экономики. М.: Макс Пресс, 2003.
13. Космический аппарат „SESAT“ со сроком активного существования 10 лет. Принципы, методы и результаты комплектации аппаратуры электрорадиоизделиями: Техн. отчет / НПО прикладной механики; А. Г. Козлов, Ш. Н. Исляев, В. В. Федосов и др. Красноярск, 1999. 408 с.

Сведения об авторах

- Виктор Владимирович Федосов** — ОАО „Испытательный технический центр — НПО ПМ“, Железногорск, Красноярский край; зам. директора
- Виктор Иванович Орлов** — ОАО „Испытательный технический центр — НПО ПМ“, Железногорск, Красноярский край; директор

Рекомендована ОАО „ИСС“

Поступила в редакцию
19.11.10 г.