

Лекция 4. Отказы изделий электронной техники. Отбраковочные испытания. Тренировка ИЭТ.

Отказ ИЭТ - событие, заключающееся в полной утрате работоспособности изделия или уходе одного, либо нескольких параметров за допустимые по технологическим условиям нормы. По механизму отказы ИЭТ делятся на 5 категорий:

- отказы, связанные с явлениями в объеме кристалла,
- отказы, обусловленные явлениями на поверхности кристаллической структуры,
- отказы, зависящие от состояния внутренних контактных соединений,
- отказы, связанные с конструктивным оформлением,
- отказы, связанные с внешним воздействием при применении ИЭТ.

Основные отказы на стадиях жизненного цикла ИЭТ

Таблица 1

Технологическая операция	Механизм отказа	Вид отказа
Диффузия и окисление	Дефект окисла	КЗ, О
	Загрязнение	Д
	Поверхностные состояния	Д
	Ошибки в топологии	КЗ, О, Д
Металлизация	Разрыв на ступеньке окисла	О
	Коррозия	О
	Электромиграция	О, КЗ
	Обрыв у контакта	О
	Ошибка при травлении	О, КЗ
Сборка	Отслаивание металла	О
	Растрескивание кристалла	О, КЗ
	Пережим проволочного вывода или его отслаивание в месте сварки	О
	Формирование металлического соединения	О, КЗ
	Посторонняя частица	КЗ
	Царапина на кристалле	О, КЗ
Герметизация корпуса	Негерметичность корпуса	Д, О
	Образование "усов" на металлизации, коррозия	КЗ, О
	Проникновение влаги	О, Д
Применение	Статическое электричество	КЗ
	Превышение допустимых режимов	КЗ, О, Д

, где КЗ - короткое замыкание, О - обрыв, Д - деградация электрических параметров.
В общем механизмы отказов формируются тремя факторами:

- конструкцией изделия;

- технологией изготовления;
- режимом и условиями эксплуатации.

Различают следующие виды отказов:

(электродиффузия, взаимная диффузия, зарядовая нестабильность пленки SiO_2 , электрокоррозия)внезапные.

Технологические и конструктивные дефекты и режимы эксплуатации могут приводить как к внезапным, так и к постепенным отказам. Технологические и конструктивные дефекты:

- тепловая неустойчивость,
- плохое качество напайки кристалла к основанию,
- неоднородность толщины кристалла,
- дефекты в области р-п переходов,
- уменьшение поперечного сечения и другие дефекты металлизации,
- отслаивание металлической пленки из-за плохой адгезии,
- загрязнению в объеме окисла и на его поверхности,
- влага и загрязнение.

Влияние режимов эксплуатации сводится к:

- влияние нагрузки по току,
- влияние нагрузки по напряжению,
- влияние нагрузки по мощности,
- влияние температуры,
- влияние термоциклов,
- влияние механической нагрузки,
- влияние статических зарядов,
- влияние радиации.

В настоящее время к качеству и надежности интегральных микросхем (ИС) предъявляются очень высокие требования независимо от того, в какой радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) они будут применены: для комплектации ракет, авиационных объектов, атомных электростанций или в телевизорах, видеомагнитофонах.

Подсчитано, если дефектные изделия электронной техники (ИЭТ) составляют 2% в партии, то это приводит в среднем к работоспособности только 72% изготовленной РЭА. Расходы на восстановление РЭА при отказе ИЭТ в эксплуатации выше на порядок, чем расходы, на восстановление работоспособности аппаратуры при ее изготовлении. Надежность ИЭТ при эксплуатации характеризуется кривой зависимости интенсивности отказов от времени. Данная кривая показывает относительно высокую интенсивность отказов в период ранних отказов (период приработки), сравнительно низкую и стабильную интенсивность отказов в период эксплуатации и возрастающую интенсивность

в период износа (после примерно 25 лет нормальной работы). Ранние отказы возникают, как правило, вследствие конструктивных и технологических недостатков. В нормальных условиях работы этот период длится до 1000 часов или примерно недель. На окончание этого этапа указывает выравнивание кривой интенсивности отказов. Интенсивность отказов в период приработки имеет тенденцию к уменьшению по мере усовершенствования конструкции и технологии.

В настоящее время общеприняты два основных направления увеличения надежности выпускаемых ИЭТ:

- устранение причин отказов при изготовлении изделий путем изучения, усовершенствования производственного процесса и повышения контроля, т.е. воздействие на процесс производства посредством обратной связи передачи информации и создания в конечном счете бездефектной технологии;
- выявление и удаление изделий с отказами (действительными и потенциальными) из готовой партии до поставки потребителю.

Наиболее эффективным методом повышения качества и надежности выпускаемых изделий является первый метод. Необходимо всеми силами добиваться более эффективной и оперативной производственной обратной связи.

Известно, что отказы возможны даже в хорошо освоенном производстве. По этой причине распространенным способом повышения качества и надежности выпускаемой партии ПП и ИС (а не конкретно каждого изделия) является проведение отбраковочных испытаний в процессе выходного контроля этих партий на заводе-изготовителе. Считается, что случайных отказов ИЭТ не бывает, каждый отказ имеет причину и является следствием приложения некоторой нагрузки. "Слабые" ИЭТ, которые остались не выявленными к началу эксплуатации, могут явиться причиной их отказов. Для того, чтобы отбраковочные испытания были эффективными, нужно знать, какие нагрузки и как ускоряют появление отказов. Опыт использования ИС в РЭА показывает, что внедрение отбраковочных испытаний существенно повышает средний уровень их надежности.

В табл.2 даны отдельные виды отбраковочных испытаний и процент отбракованных ИС. Многие различные по природе слабые места приводят к одним и тем же механизмам отказов, многие одинаковые механизмы отказов ускоряются различными нагрузками. В частности, работа ИС при повышенной температуре и термоциклы ускоряют многие механизмы отказов. Повышенные температуры вызывают ускорение ряда химических реакций, к усилению коррозии, старению, ухудшению изоляции, к снижению пробивного напряжения, растрескиванию пластмассы, увеличению токов утечки.

Таблица 2

Метод испытаний	% отбракованных ИЭТ
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

Тренировка ИЭТ.

Тренировка - это метод отбраковки, при котором изделия заставляют работать некоторое время в определенных условиях окружающей среды с подачей или без подачи электрической нагрузки, рассчитанных таким образом, чтобы в процессе тренировки вызвать отказ потенциально ненадежных изделий, не повреждая хорошие. Тренировка фактически ускоряет старение ИЭТ и предназначена для "выжигания" ранних отказов, т.е. отбраковки потенциально ненадежных ИЭТ и повышения надежности партии оставшихся в ней ИЭТ. Следовательно ИЭТ, выдержавшие тренировку, будут иметь более низкую и постоянную частоту отказов, что значительно повышает надежность РЭА, в которой эти ИЭТ используются. Разумеется, тренировка ИЭТ дает положительные результаты лишь в том случае, когда до и после нее проводятся испытания электрических параметров. Обычно считается, что тренировка в подобранном для конкретного типа ИЭТ режиме и последующие электрические испытания позволяют выявить и отбраковать 100% дефектных приборов. На практике 5...20% отказов от общего числа потенциально ненадежных изделий остаются невыявленными из-за ошибок оператора, недостатков испытательной аппаратуры и ограничения времени, в течение которого проводится тренировка изделия.

Под тренировкой будем понимать все виды электротренировок (ЭТ), электротермотренировок (ЭТТ) и термотренировок (ТТ). Каждый из перечисленных видов тренировок имеет свои достоинства и недостатки, поэтому необходимо проведение работы по выбору вида тренировки, ее режима для конкретного типа ИЭТ. Прежде всего необходимо добиться, чтобы при проведении тренировки ИЭТ по выбранной методике выявлялось не менее 95% потенциально ненадежных изделий. Данная величина достоверности результатов тренировки считается нормальной и соответствует военным техническим условиям США MIL-STD-883. Затем, накопив определенный опыт, можно совершенствовать эту методику. К выбору конкретной методики тренировки, ее режимов необходимо относиться очень внимательно с тем, чтобы избрать наиболее оптимальный, режим (в том числе по времени и стоимости К позволяющий о наибольшим процентом отбраковать потенциально ненадежные ИЭТ, и в то же время не вызвать появления новых дефектов, показывающих, что идет ускоряющий процесс, снижающий неизвестно насколько долговечность изделий.

Электротренировка

Электротермотренировка ПП и ИС (или испытания на принудительный отказ) является эффективным и в то же время дорогим методом и проводится с целью отбраковки изделий, имеющих внутренние дефекты либо дефекты, связанные с отклонениями технологического процесса, которые могут вызвать в дальнейшем отказы, зависящие от времени и нагрузки.

Цель ЭТ - обеспечить нагрузку, равную или несколько меньшую максимально допустимой при эксплуатации, или обеспечить такие эквивалентные условия испытаний, которые позволили бы свести к минимуму отказы изделий, зависящие от времени и нагрузки. ЭТ активных ИЭТ может проводиться следующими различными методами в режимах:

- статическом с обратным смещением переходов;
- статическом с прямым смещением переходов;
- динамическом с последовательным или параллельным возбуждением;
- кольцевого генератора;
- энергоциклирования, т.е. в режиме "включено-выключено".

Метода тренировки различных ИЭТ в принципе аналогичны, но значительно различаются в деталях. Большая эффективность тренировки с обратным смещением, обнаруженная первоначально при испытаниях транзисторов, вызвала желание так же поступить с ИС. Однако при воздействии

отрицательного смещения, например на ТТЛ ИС, примерно половина полупроводниковых переходов оказывается смещенной в обратном направлении, а другая половина - в прямом. При тренировке приборов с прямым смещением температура р-п перехода возрастает до 150...170°С в результате заданных электрических режимов, температура же корпуса прибора при этом не превышает 25°С; при тренировке приборов с обратным смещением температура окружающей среде выбирается равной 80...150 °С (т.е. обязательно необходима тренировка при повышенной внешней температуре). Тренировка отдельных линейных ИС и ЭДП ИС, в которых возможны поверхностные дефекты, выполняется в режиме обратного смещения. Логические ИС обычно тренируют в режиме, когда все схемы переключаются с большой скоростью, применяя для этого возбуждение от внешнего программирующего устройства. Можно также соединить логические ИС в группы по кольцевой схеме с соответствующим числом (четным или нечетным) схем в каждом кольце, чтобы обеспечить положительную обратную связь.

Наблюдается тенденция проводить тренировку как логических, так и линейных ИС только при обратном смещении, что проще и дешевле по сравнению с другими методами. Выбор между статическим и динамическим режимами тренировки часто вызывает затруднения, так как каждый из них имеет преимущества и недостатки в ускорении отказов, вызываемых:

1. ионными загрязнениями или другими дефектами, приводящими к отказам вследствие миграции зарядов,
2. дефектами кремния или окисла типа точечных "проколов",
3. перемежающимися отказами вследствие радиоактивности материалов корпуса.

Проявление дефектов МОП-приборов из-за ионных загрязнений кристалла наиболее эффективно ускоряется высокой температурой и постоянным электрическим напряжением с полярностью, способствующей перемещению зарядов к границе раздела $Si - SiO_2$. Таким образом, постоянное смещение схемы, обеспечивающее как положительное, так и Отрицательное электрическое напряжение в окисле затвора, ускоряет механизмы отказов, связанных с миграцией заряда, лучше, чем динамическое смещение. Динамическое смещение создает нужную полярность напряжения только в течение части динамического цикла, тогда-как во время остальной части цикла может происходить обратное перераспределение заряда. Кроме того, в случае статического смещения допустима большая температура окружающей среды, так как в этом режиме не происходит функционирование приборов.

Механизмы отказов, обусловленные случайными изолированными дефектами (точечными проколами) лучше обнаруживаются с помощью динамического смещения, обеспечивающего подачу напряжения поочередно на все схемные элементы. Статическое смещение может не создать электрической нагрузки на мелких дефектных участках.

Перемежающиеся функциональные отказы вследствие радиационных эффектов не ускоряются ни статическим, ни динамическим смещением. Их можно обнаружить путем непрерывного наблюдения за работой испытуемого прибора. Поскольку воздействие статическим и динамическим смещением не является абсолютно эффективным для всех типов дефектов ИС, его выбор должен основываться на знании ожидаемых механизмов отказов.

Если предполагаются все типы отказов или могут возникнуть неизвестные ранее, приборы следует испытывать как в статическом, так и в динамическом режимах. Важную роль в выборе режимов тренировки играют также экономические аспекты.

Выгоды, получаемые при считывании выходных сигналов испытуемых ИЭТ во время тренировки, заставили производителей ИС за проводить эксперименты с использованием системы TDBI, т.е. тестирование одновременно с электротронировкой (test-during-burn-in). Некоторые из них внедрили эти системы для отбраковки в производственных условиях, а также для исследований с целью обеспечения качества надежности ИС. Среди них:

- тестирование ранних отказов,
- тестирование сбоев, вызываемых воздействием альфа-частиц,
- тестирование на восстанавливаемые отказы,
- тестирование ЗУ на чувствительность к кодовым комбинациям,
- определение чувствительности регенерации и другие.

Проведенные исследования показали, что внедрение системы тестирования одновременно с ЭТ привело к сокращению времени, затрачиваемому на тренировку, на 85% для динамических запоминающих устройств с произвольным доступом (ЗУПД) емкостью 64 К. Кроме того, данные о неисправностях, полученные с помощью системы, помогли внести изменения в процесс, что увеличило выход годных устройств с 96 до 98,5%. Более короткое время тренировки снизило затраты, так как на единицу производственной мощности требуется меньше систем термотренировки. И разумеется, лучший вывыход ИЭТ означал снижение затрат на производство одного изделия. Некоторые отказы могут быть выявлены только с помощью системы TDBI, например перемежающиеся или случайные сбои ЗУ вызываемые воздействием альфа-частиц. Эта система позволяет точно сказать, в какой момент произошло нарушение контактирования изделия или замыкание в гнезде печатной платы. По данным IBM, система TDBI дополнительно отбраковывала до 20% от всего количества отказов по причине восстановления параметров после изъятия изделия из испытательного стенда тренировки. Правильно проводимая тренировка с использованием TDBI может снизить отказы РЭА в эксплуатации для ИЭТ, серийно выпускаемых длительное время, в 2 раза, а для новых изделий - в одиннадцать раз.

Электротермотренировка

Срабатывание механизмов отказов ИС в большинстве случаев ускоряется под воздействием температуры и напряжения или тока, поэтому в процессе тренировки ИС должны работать при максимально допустимом напряжении и максимально возможной температуре. Однако при этой температуре не должно быть тепловой перегрузки, изменений логических состояний, а также недопустима большая плотность тока в металлизации.

ЭТТ является эффективным средством ускорения срабатывания эксплуатационных механизмов отказов. Она дает много информации за короткое время, но достоверные результаты можно получить на основе правильного выбора электрических и тепловых нагрузок, выявления видов и механизмов отказов, соответствующих начальным условиям эксплуатации, а также статистической обработки полученных результатов.

Методы ЭТТ могут использоваться те же, что и для ЭТ, плюс внешнее воздействие повышенной температуры. Температуры, при которых проводятся тренировки, составляют 55, 70, 85, 100, 125 и 150 °С. ЭТТ ведется на специальных стендах при строгом контроле температуры. Эффективность ЭТТ сложных БИС зависит от используемых цепей возбуждения и нагрузки, а также от температуры и продолжительности процесса тренировки. В отношении сравнительной эффективности динамических и статических режимов испытаний МОП БИС нет единой точки зрения.

ЭТТ в статическом режиме способствует выявлению ИС с дефектами поверхности, которые проявляются в виде токов утечек или уменьшения быстродействия.

ЭТТ в динамическом режиме выявляет дефекты ячеек запоминающих устройств (ЗУ) на МОП-транзисторах, обусловленные плохим качеством изготовления.

Наибольшее распространение получила ЭТТ МОП БИС в статическом режиме на уровне устройств, когда на все входы и выходы схемы дается напряжение определенного уровня. Некоторые фирмы применяют данный вид тренировки совместно с тренировкой в динамическом режиме, проводимой на уровне плат или систем.

ЭТТ различные фирмы проводят при более высоких температурах (до 300 °С), считая, что при повышенных температурах постоянное значение интенсивности отказов достигается в течение более короткого времени, чем при более низких температурах.

Установлено, что в процессе отбраковки ИС тридцатичасовая тренировка при температуре 150 °С эквивалентна режиму тренировки в течение 168 ч при температуре 125 °С. Однако следует учитывать, что при повышенных температурах могут возникать повреждения, обусловленные большими неконтролируемыми внутренними токами или другими причинами, которые не поддаются контролю при тренировке с высокими температурами.

Термотренировка ИЭТ

Известно, что некоторые несовершенства конструкции и нарушения технологии при изготовлении ИС могут проявляться при испытаниях на хранение, как при повышенных, так и при пониженных температурах. При повышенных температурах ускоряется диффузия примесей и зарядов на поверхности полупроводника, увеличивается подвижность ионов в оксиде, повышается влаго- и газоотделение частями изделия, ускоряется процесс старения сплавов, лучше выявляются механические напряжения.

При пониженных температурах появляется воздействие термических напряжений на спаи и на р-п-переходы ИС. Исследования показывают, что если процент отказов ИС после ЭТТ составляет доли процента, то ЭТТ с большой достоверностью (0,9) может быть заменена на термотренировку.

Время ТТ должно быть не менее времени ЭТТ, но температура воздействия выше внешней температуры ЭТТ, то есть температура ТТ должна быть равной температуре р-п-переходов (кристалла) при ЭТТ. Практически это легко рассчитывается, так как в технических условиях на изделие всегда дается значение теплового сопротивления переход-среда.

Независимые фирмы (лаборатории) по отбраковке комплектующих изделий включают в отбраковочные испытания и стабилизирующую тренировку-испытание на пребывание при высокой температуре, обычно при температуре 150°С, в течение 48 часов, чтобы ускорить ухудшение параметров из-за химических процессов, вызванных поверхностными загрязнениям, или из-за нестабильности окисла.

Высокотемпературное старение

Разновидностью тренировки можно считать высокотемпературное старение (хранение, метод 1008 MIL-STD-883). Считается, что испытания при температурах +125°С в течение 1000 ч (метод 1005, 1006 MIL-STD-883) дают обычно только информацию о доле забракованных ИС в партии. Такие испытания не дают информации ни о механизмах отказов, ни об их распределениях, ни об их коэффициентах ускорения. Наиболее распространены испытания ИС на долговечность при температурах, физически допустимых конструкцией ИС без подачи электрической нагрузки, продолжительностью 48-100 ч и более, исходя из допущения, что при этих нагрузках действуют те же самые механизмы отказов, что и при нормальных условиях эксплуатации.

Задача таких испытаний заключается в том, чтобы при малом времени испытаний исключить потенциально ненадежные ИС.

Высокотемпературное старение, проводимое при температуре 300 °С, способно выявить в течение нескольких часов такие изменения в элементах конструкции схем, которые, в конечном счете, произошли бы в них при длительной работе (может быть, в течение нескольких десятков лет) в нормальных условиях. При таких пороговых температурах (200-300 °С) можно наблюдать механизмы отказов, относительно редко проявляющиеся при умеренных температурах. Однако в этом случае происходит быстрый расход прочности конструкции схемы.

Интенсивность отказов КМОП ИС при высокотемпературном старении показана на рис.1. Типичное распределение времени до наступления отказа имеет бимодальный характер. Энергия активации ме-

ханизмов отказа для ИС основной части выборки оценивается величиной 1,3 эВ, а для аномальных ИС, как правило, не превышает 0,9 эВ.

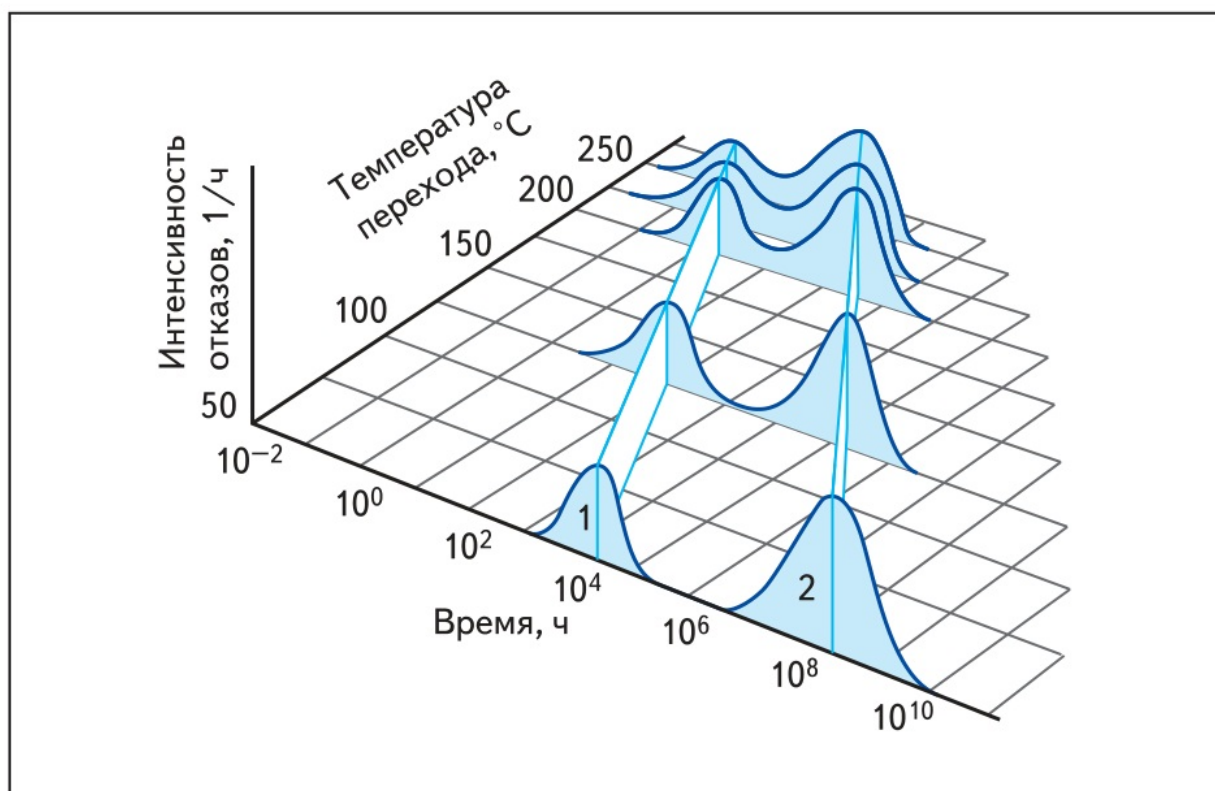


Рис. 1. Интенсивность отказов КМОП ИС при высокотемпературном старении:
1 — распределения для аномальных ИС,
2 — распределения для основной части выборки

Испытания по методу "температура-влажность-напряжение смещения"

Для негерметичных корпусов ИС наиболее эффективен метод отбраковки "температура-влажность-напряжение смещения". В условиях повышенной температуры (до $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$) и относительной влажности ускоряется коррозия металлических частей ИС в силу действия гальванических или электролитических процессов. Чаще всего для испытаний ИС выбирают температуру $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительную влажность RH 85%.

Объясняется это тем, что именно такие условия легче поддаются контролю и воспроизведению, в то время как температура $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$ и насыщенный пар, выбранные в качестве условий проведения испытаний, хотя и ускоряют ход проверок на долговечность, но делают результаты более неопределенными. Гальваническая коррозия алюминиевой металлизации является основным механизмом деградации ИС в пластмассовых корпусах. Установлено, что процессы проникновения влаги подразделяются на медленные и быстрые. Быстрый перенос влаги связывают с влиянием водорода в органической эпоксидной матрице материала корпуса, а медленный - с проникновением через кремниевый наполнитель компаундов. Процесс проникновения воды через корпус ИС не зависит от типа последней, а определяется величиной смещения и температурой.

На рис. 2 показаны результаты испытаний одинаковых ИС при двух различных видах испытаний — в автоклаве и при испытаниях «температура-влажность» в различных условиях. Нарис.2

показано изменение долговечности биполярных ИС в пластмассовых корпусах при испытаниях «температура–влажность–напряжение смещения» в зависимости от изменения температуры. В данном случае испытания проводятся при постоянном напряжении смещения, равном 36 В, и относительной влажности 85%.

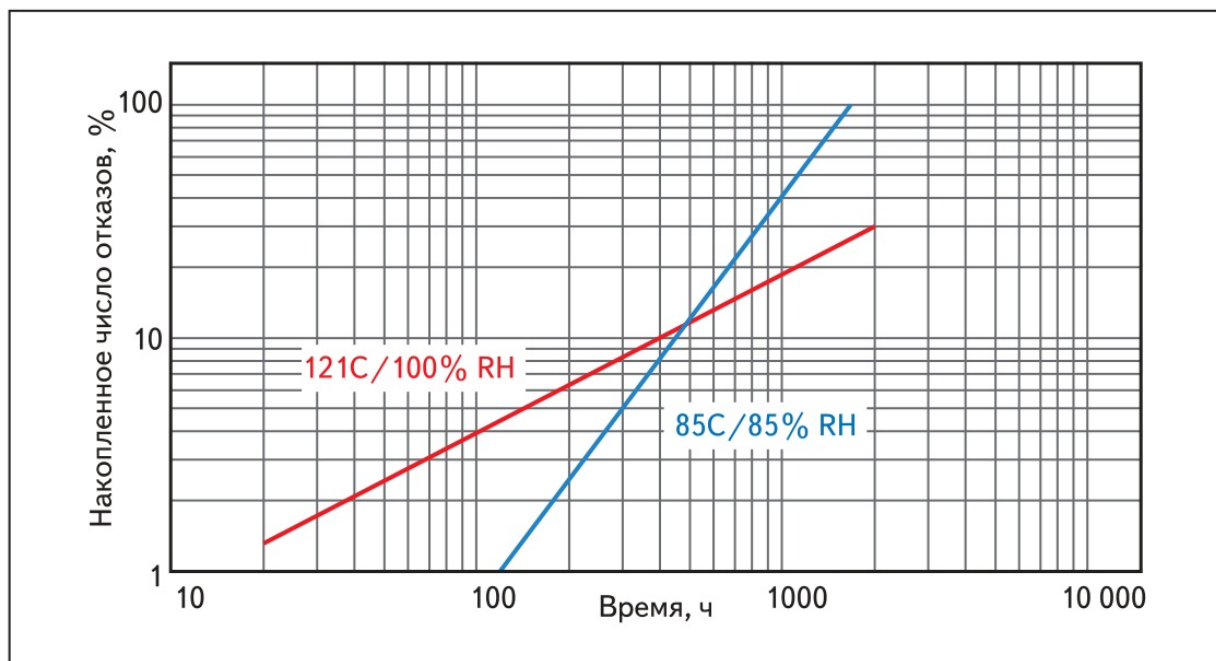


Рис. 2. Накопленное число отказов одних и тех же ИС при испытаниях в автоклаве (121 °С / 100% RH) и при испытаниях «температура–влажность» (85 °С / 85% RH)

Анализ рис.2 и 3 позволяет сделать вывод, что процент отказов одних и тех же ИС сильно зависит от вида и условий проведения испытаний ИС.

Режим энергоциклирования ИС

В реальных условиях эксплуатации ИС чаще всего работают периодически, то есть подвергаются внезапному включению электрического режима, а затем внезапному его выключению. Замечено, что зачастую ИС надежно работают в постоянно включенном режиме, но их надежность падает в зависимости от того, как часто режим включается и выключается. Поэтому в последние годы стал широко использоваться при электротренировке прерывистый режим, то есть циклическое изменение электрических воздействий "включено/выключено" - режим энергоциклирования. ИС может испытываться в любом режиме включения (статическом или динамическом), но периодически оказывают воздействие или отключаются установленные электрические входные сигналы.

На рис. 4 приведены графики зависимости среднего времени наработки до отказа ИС в пластмассовых корпусах от относительного числа циклов при температуре 85 °С и относительной влажности RH85%. Продолжительность цикла (включено или выключено) составляет 4 ч. Видно, что чем больше мощность потребления ИС, тем меньшее число циклов выдерживает схема.

Термоциклирование

Цикличность температуры является способом отбраковочных испытаний ИС, когда температура окружающей среды меняется быстро и часто в диапазоне от -60 до +200 °С с охлаждением в воздухе

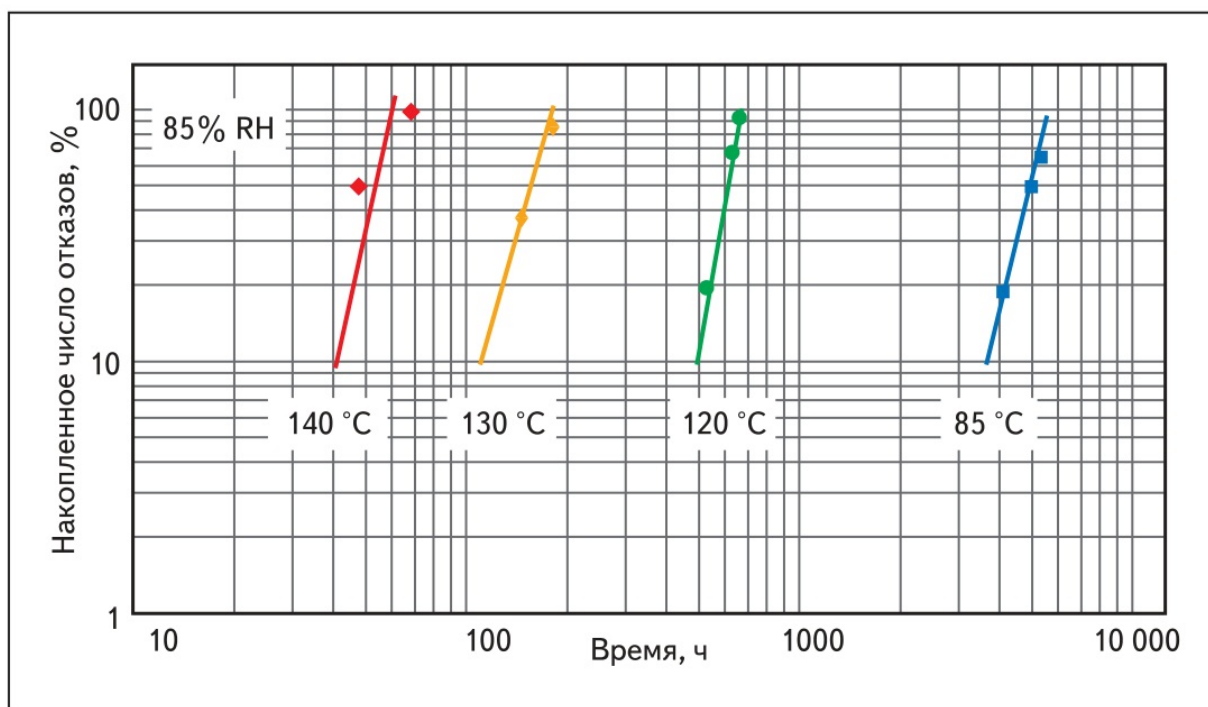


Рис. 3. Накопленное число отказов биполярных ИС в зависимости от времени испытаний при относительной влажности $RH=85\%$ и различных температурах — 85, 120, 130, 140 °C

(термоциклы, метод 1010) или в том же температурном диапазоне с нагреванием и охлаждением в жидкости (термоудары, метод 1011). Термоциклы или термоудары способны вызвать деградацию проволочных соединений ИС (в особенности проводников с наибольшей длиной), ухудшение герметичности и прочности соединений.

Деградация начинается с первого же цикла и прогрессирует по мере увеличения их числа. Продолжительные воздействия приводят к катастрофическим отказам. Таким образом, термоциклы позволяют ускорить скрытые дефекты в конструкции схем (например, несоответствие коэффициентов термического расширения используемых материалов в конструкции ИС). Если этого вовремя не обнаружить, то наблюдается усталость стыков, особенно после многократного количества циклов температурных изменений.

Термоциклирование с нагреванием и охлаждением в воздухе в основном оказывает влияние на внутренние межсоединения. Термоудары с нагреванием и охлаждением в жидкости влияют на герметичность корпуса и в меньшей степени - на проволочные соединения. Признаками структурного разрушения герметизации являются микротрещины внутри и на поверхности стекла, а так же на поверхности раздела стекла или металла с керамикой, вызванные напряжениями в спаях керамических корпусов. Установлено, что термоудары слабо влияют на электрические параметры ИС.

Продолжительность тренировок ИС и их место в технологическом процессе отбраковочных испытаний

Продолжительность тренировок остается проблемой как для изготовителя, так и для потребителя изделий. Малое число отказов может трактоваться как следствие недостаточной продолжительности испытаний, и, наоборот, большое количество отказов может служить свидетельством чрезмерной продолжительности тренировки.

В настоящее время длительность ЭТТ различных схем в разных режимах составляет 48, 72, 96, 120, 168, 240 ч, а в отдельных случаях и больше. По данным фирмы Fairchild Semiconductor, большая

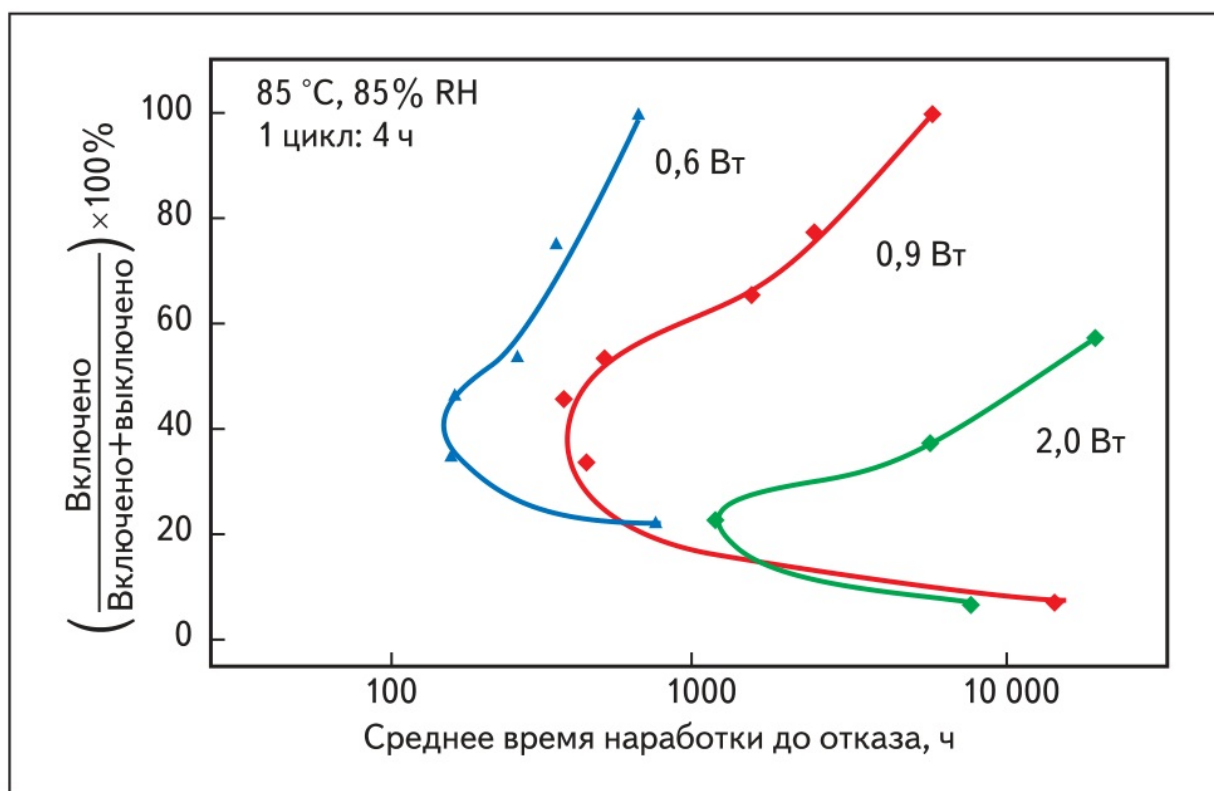


Рис. 4. Зависимость среднего времени наработки до отказа ИС в пластмассовых корпусах от режима энергоциклирования

часть отказов происходит в первые 96 ч. В большинстве национальных стандартов, а также международных документов (например, публикация №747 МЭК) устанавливается объем и последовательность проведения отбраковочных испытаний ИС, в которые включается ЭТТ продолжительностью 48, 96, 168 ч.

Типичная температура для испытаний составляет 125 °С, а длительность испытаний при ЭТТ берется равной минимально 48 ч, максимально 168 ч. Оптимальным временем с точки зрения экономической эффективности считается 96 ч. Экспериментально подтверждается, что время ЭТТ для МОП ИС всегда больше, чем для биполярных. Согласно стандарту MIL-STD-883 ЭТТ проводится в течение 168 или 240 ч в зависимости от класса надежности при температуре 125 °С в динамическом режиме и 72 ч - при 150 °С в статическом режиме при обратном смещении для изделий повышенной надежности.

Практически время ЭТТ устанавливается при проведении неоднократных испытаний на партиях ИС, изготовленных в разное время, путем контроля электрических параметров через каждые 24 ч. Если, например, после 72 ч отказов не наблюдается, то время ЭТТ выбирается равным 96 ч, то есть определяется самым качеством изделий. Анализ результатов испытаний показывает, что если более 50% отказов ИС являются катастрофическими, то это говорит о неуправляемости и нестабильности технологического процесса. Отказы в этом случае проявляются практически в первые 12 ч ЭТТ. При стабильном технологическом процессе изготовления ИС, когда количество отказов на ЭТТ менее 5%, анализ результатов испытаний показывает, что более 90% отказов ИС происходит из-за ухода их электрических параметров за установленные нормы по ТУ. Стандарт MIL-STD-883 предусматривает, что после ЭТТ допустимый процент дефектных изделий не должен превышать 5, а для изделий повышенного класса качества - 3%, или одно дефектное изделие на партию. Анализ отказавших при ЭТТ ИС, имеющих выход электрических параметров за допуск, установленный в ТУ, показал, что

при перепроверке этих схем через 24-48 ч часть из них входят в допуск по параметрам, то есть становятся годными. В большей степени это связано с нестабильностью поверхности полупроводникового кристалла, оксидной пленки из-за дрейфа ионов. Если эти ИС поставить заказчикам, то при работе в аппаратуре они откажут в первую очередь. Поэтому необходимо ввести следующие ограничения на время проверки партии ИС после проведения ЭТТ: замер электрических параметров начинать практически сразу после изъятия ИС из нагретой камеры стенда ЭТТ и заканчивать проверку всей партии не позднее 8 ч, то есть в одну рабочую смену.

На эффективность ЭТТ также влияет место, которое она занимает в общей последовательности отбраковочных испытаний. Как правило, отбраковочные испытания имеют такую последовательность (например, для большинства классов надежности по стандарту MIL-M-38510): термоциклирование, воздействие постоянного ускорения, проверка герметичности, проверка электрических параметров, ЭТТ и вновь проверка электрических параметров. Видно, что проверка герметичности проводится до ЭТТ. Наш опыт показывает, что для ИС, герметизируемых пайкой, такая последовательность отбраковочных испытаний не гарантирует отбраковки потенциально ненадежных изделий.

Таблица 3

Вид испытаний	Условия	Длительность*	Примечание
Испытание на срок службы при непрерывной нагрузке	125 °C	1000 ч	Метод 1005 (статический режим)
Испытание на срок службы в прерывистом режиме	125 °C	1000 ч	Метод 1006 (динамический режим)
Высокотемпературное старение (хранение)	150 °C	1000 ч	Метод 1008. Без подачи напряжения питания
Термоциклы (воздух/воздух)	−65...+150 °C минимум 5 мин при каждом экстремальном значении температуры	1000 циклов	Метод 1010 1000 циклов
Термоудары (жидкость/жидкость)	0...+100 °C	1000 циклов	Метод 1011 1000 циклов
Испытания «температура—влажность—напряжение смещения»	85 °C/85% RH U _{см} от 5 до 15 В	1000 ч	Для негерметичных корпусов
Ускоренные испытания в автоклаве	119 °C/100% RH, P=2 атм, 100...140 °C/85% RH, P=1,1...2,5 атм	1000 ч	Для негерметичных корпусов
* Примечание. Если за указанную длительность испытаний на долговечность не произошло отказов, то испытания продолжают до достижения 50% отказов в выборке; U _{см} — напряжение смещения; P — давление в автоклаве.			

ЭТТ при температуре 125 °C (фактическая температура на корпусе может быть до 150 °C) вскрывает ложно герметичные схемы (из-за перекрытия малых отверстий канифолью). Поэтому проверка герметичности ИС с помощью пайки должна проводиться после ЭТТ. Как правило, тренировка проводится на загерметизированных ИС. Но практика показывает, что в некоторых случаях для ИС можно проводить ЭТТ до герметизации. Достоинство такой тренировки состоит в том, что возможна доработка отказавших ИС без повреждения корпуса и внутренних элементов.

Требования к отбраковочным испытаниям ИС за рубежом

Наиболее отработанной в настоящее время является методика отбраковочных испытаний, предусмотренная стандартом США MIL-STD-883. Требования по отбраковочным испытаниям классифицируются по трем уровням качества и надежности:

- Класс А включает только схемы повышенной надежности, предназначенные для работы в жестких режимах внешних воздействий.
- Класс В включает надежные для промышленного применения схемы (и некоторые типы схем для военной аппаратуры), предназначенные для работы в менее жестких условиях, когда главным требованием является стабильность параметров в течение длительного времени.
- Класс С включает схемы для условий работы, когда воздействующие факторы не являются определяющими и когда на первое место ставится минимальная стоимость.

Анализ данных по результатам тренировки

На предприятии-изготовителе ИЭТ, где для повышения надежности выпускаемой партии продукция подвергаются тренировке 100%. Поскольку тренировка - это не что иное, как кратковременное испытание на срок службы, то, пользуясь этими, данными, можно:

- сократить расходы на испытания;
- определить доверительную вероятность найденной надежности или интенсивности отказов;
- обеспечить непрерывный контроль производственного процесса не только в целях его проверки, но и для внесения в него изменений.

Кроме того, 100%-ная тренировка все время дает новые отказы - результаты анализа которых можно непосредственно использовать для, эффективного воздействия на производственный процесс или для разработки конструктивно-технологических мер по ликвидации причин отказов.

Данные тренировки дают оценку общего состояния производственного процесса, его управляемости и стабильности: например, уменьшается ли в настоящее время процент отказов по сравнению с тем, который был прежде, не появился ли новый механизм отказа, чтобы своевременно принять меры по его исключению.