

Технологические тренировки интегральных схем

Митрофан ГОРЛОВ,
д. т. н.
Андрей СТРОГОНОВ,
д. т. н.
Дмитрий ШАЦКИХ

Любая представленная выборка при выпуске интегральных схем (ИС) состоит из трех различных по надежности групп: группа, характеризующаяся интенсивностью отказов, соответствующей требованиям технических условий (ТУ) на ИС, группа более надежная и группа ИС, менее надежная по сравнению с требованиями ТУ.

Целью отбраковочных технологических испытаний ИС является отбраковка схем, менее надежных по сравнению с требованиями ТУ.

Во всех отечественных регламентирующих документах по выпуску ИС имеется указание, что в процессе изготовления должны проводиться 100%-ные отбраковочные испытания. Состав обязательных 100%-ных испытаний включает от 10 до 20 видов процедур в зависимости от уровня качества и надежности выпускаемых ИС. Требования по отбраковочным испытаниям у зарубежных изготовителей ИС (например, в США) классифицируются по трем уровням качества и надежности (классы А, В, С). Наиболее отработанной в настоящее время является методика отбраковочных испытаний, предусмотренная стандартом США MIL-STD-883. Наиболее длительной и дорогостоящей процедурой из всех отбраковочных испытаний является тренировка ИС.

Тренировка — это метод отбраковки, при котором ИС заставляются работать некоторое время в определенных условиях окружающей среды с подачей или без подачи электрической нагрузки, рассчитанной таким образом, чтобы в процессе тренировки вызвать отказ потенциально ненадежных схем, не повреждая хорошие. Тренировка фактически ускоряет старение ИС и предназначается для «выжигания» ранних отказов, то есть для отбраковки потенциально ненадежных ИС и повышения надежности партии оставшихся в ней схем. Следовательно, ИС, выдержавшие тренировку, будут иметь более низкую и постоянную частоту отказов, что значительно

повышает надежность РЭА, в которой эти ИС используются. Разумеется, тренировка ИС дает положительные результаты лишь в том случае, когда до и после нее проводится контроль электрических параметров.

Под тренировкой понимаются все виды электротренировок (ЭТ), электротермотренировок (ЭТТ) и термотренировок (ТТ) (табл. 1). Каждый из перечисленных видов тренировок имеет свои достоинства и недостатки, поэтому необходимо проведение работы по выбору вида тренировки, ее режима для конкретного типа ИС. Прежде всего, необходимо добиться, чтобы при проведении тренировки ИС по выбранной методике выявлялось не менее 95% потенциально ненадежных изделий. Данная величина достоверности результатов тренировки считается нормальной и зафиксирована военным стандартом США MIL-STD-883.

Электротренировка ИС

Электротренировка ИС, или испытание 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 в технологическом процессе, 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 за короткое время выявить максимальное число потенциально ненадежных изделий в испытываемой партии.

ЭТ ИС может проводиться различными методами в следующих режимах: статическом с обратным смещением переходов; статическом с прямым смещением переходов; динамическом с последовательным или парал-

лельным возбуждением кольцевого генератора; энергоциклирования, то есть в режиме включено/выключено.

Тренировка МОП ИС, в которых возможны поверхностные дефекты, выполняется в режиме обратного смещения. Логические ИС обычно тренируются в режиме, когда все схемы переключаются с большой скоростью, для этого применяется возбуждение от внешнего программируемого 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.

Выбор между статическим и динамическим режимами тренировки часто вызывает затруднения, так как каждый из них имеет преимущества и недостатки в ускорении срабатывания механизмов отказов. Проявление дефектов в МОП ИС из-за ионных загрязнений кристалла наиболее эффективно ускоряется высокой температурой и постоянным напряжением с полярностью, способствующей перемещению зарядов к границе Si-SiO₂. Динамическое смещение создает нужную полярность напряжения только в течение части динамического цикла, тогда как во время остальной части цикла может происходить обратное перераспределение заряда. Механизм отказов, обусловленных случайными изолированными дефектами, например, точечными проколами, лучше обнаруживается с помощью динамического смещения, обеспечивающего подачу напряжения поочередно на все элементы схемы. Статическое смещение может не создавать электрическую нагрузку на малых дефектных участках.

Электротермотренировка ИС

Срабатывание механизмов отказов ИС в большинстве случаев ускоряется под воздействием температуры и напряжения или тока, поэтому в процессе тренировки ИС

Таблица 1. Виды и режимы тренировок, применяемых в технологическом процессе изготовления ИС

Вид тренировки	Режим тренировки	Особенности режима тренировки
Термотренировка	Воздействие температуры	Температура повышенная
Электротренировка	Статический	С обратным смещением переходов С прямым смещением переходов
Электротермотренировка	Динамический	С последовательным возбуждением С параллельным возбуждением кольцевого генератора
Энергоциклирование	Импульсный	Измерение тока потребления до и после подачи нескольких импульсов питающего напряжения

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.

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 темпе-

ратуре 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 ИС

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 проявляется воздействие термических напряжений на спаи и на *p-n*-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 *p-n*-переходов (кристалла) при ЭТТ. Практически это легко рассчитывается, так как в технических условиях на изделие всегда дается значение теплового сопротивления переход—среда.

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

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 °С) и относительной влажности

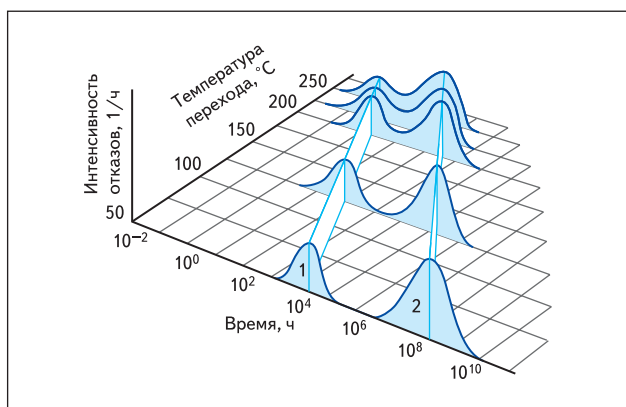


Рис. 1. Интенсивность отказов КМОП ИС при высокотемпературном старении: 1 — распределения для аномальных ИС, 2 — распределения для основной части выборки

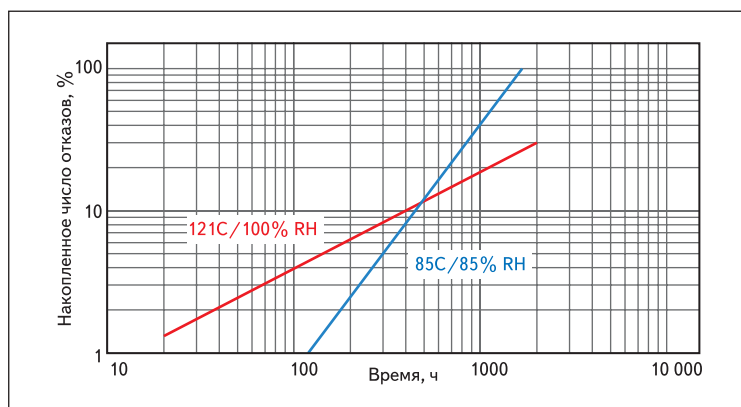


Рис. 2. Накопленное число отказов одних и тех же ИС при испытаниях в автоклаве (121 °С / 100% RH) и при испытаниях «температура–влажность» (85 °С / 85% RH)

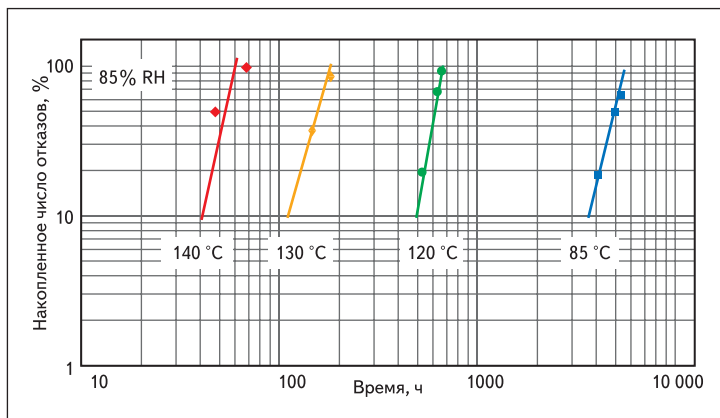


Рис. 3. Накопленное число отказов биполярных ИС в зависимости от времени испытаний при относительной влажности $RH=85\%$ и различных температурах — 85, 120, 130, 140 °C

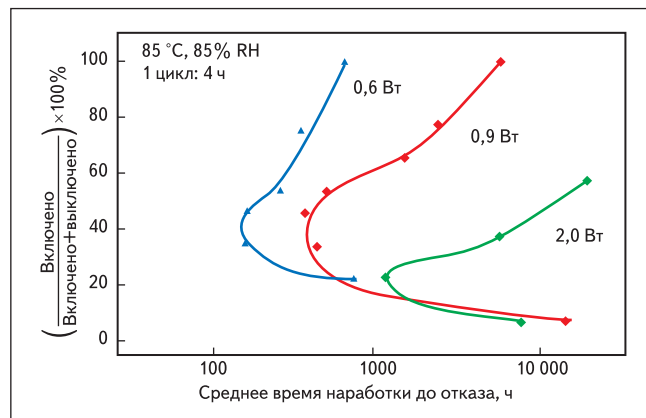


Рис. 4. Зависимость среднего времени наработки до отказа ИС в пластмассовых корпусах от режима энергоциклирования

ускоряется коррозия металлических частей ИС в силу действия гальванических или электролитических процессов. Чаще всего для испытаний ИС выбирают температуру +85 °C и относительную влажность RH 85%. Объясняется это тем, что именно такие условия легче поддаются контролю и воспроизведению, в то время как температура +120 °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 композитов. 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. На рис. 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%.

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 °C и относительной влажности RH 85%. 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 °C с охлаждением в воздухе (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 конструк-

ции 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 также на поверхности раздела стекла или металла с керамикой, вызванные напряжениями в спаих 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 тренировок.

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 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 самим 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 заказчиком, 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): термоциклирова-

Таблица 2. Последовательность отбраковочных испытаний ИС по MIL-STD-883С

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

ние, 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. ЭТТ при температуре 125 °С (фактическая температура на корпусе может быть до 150 °С) 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.

Усовершенствованной системой управляемой тренировки является система испытаний ИС во время тренировки, то есть тестирование одновременно с электротренировкой (TDBI — test during burn in). Поскольку тестирование выполняется при нахождении ИС в камере, нет необходимости снижать температуру в камере и вынимать ИС для тестирования. Это означает, что общее время на ЭТТ и испытание короче, то есть увеличивается общая производительность.

Некоторые отказы могут быть выявлены только с помощью системы TDBI, например, перемежающиеся или случайные сбои ОЗУ, вызываемые воздействием одиночных альфа-частиц, испускаемых материалом корпусов ИС. Эта система позволяет точно сказать, в какой момент произошло нарушение контактирования изделия или замыкание в гнезде печатной платы.

Требования к отбраковочным испытаниям ИС за рубежом

Наиболее отработанной в настоящее время является методика отбраковочных испытаний, предусмотренная стандартом США

MIL-STD-883 (табл. 2). 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.

Заключение

Применение технологических тренировок вызвано необходимостью повышения надежности партий ИС за счет отбраковки потенциально ненадежных схем. Режимы и время тренировок зависят от типа ИС, ее степени интеграции, технологии изготовления, вида приемки. Тренировки считаются наиболее эффективным методом отбраковочных испытаний.

Литература

1. Горлов М. И., Ануфриев Л. П., Бордюжа О. Л. Обеспечение и повышение надежности полупроводниковых приборов и интегральных схем в процессе производства / Под ред. М. И. Горлова. Минск, 1997.
2. Строгонов А. В. Долговечность субмикронных БИС и ПЛИС // Микроэлектроника. 2005. Том 34. № 2.
3. Строгонов А. Оценка долговечности БИС по результатам ускоренных испытаний // Технологии в электронной промышленности. 2007. № 3.
4. MIL-STD-883. Test Method and Procedures for Microelectronics. 1983.
5. Lall P. Tutorial: Temperature as an input to microelectronics-reliability models // IEEE Trans. Reliab. 1996. Vol. 45. № 1.