

Отбраковочные испытания

как средство повышения надежности партий ИС

Правильный подбор режима электротренировки и ее времени позволяет наиболее полно отбраковать потенциально ненадежные изделия.

Митрофан Горлов,
д. т. н.
Андрей Строгонов,
к. т. н.

andreis@hotmail.ru

Алексей Арсентьев

sci.Aleksei@mail.ru

Антон Емельянов
Владимир Плебанович

Состав отбраковочных испытаний

К качеству и надежности интегральных схем (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 и видеомагнитофонах. Подсчитано, что если дефектные ИС составляют 1% в партии, то это приводит в среднем к работоспособности только 63% изготавливаемой РЭА. Расходы на восстановление РЭА при отказе ИС в эксплуатации выше на порядок, чем расходы на восстановление работоспособности аппаратуры при ее изготовлении.

Надежность полупроводниковых изделий (ППИ) при эксплуатации характеризуется кривой зависимости интенсивности отказов от времени (рис. 1). Данная кривая показывает относительно высокую интенсивность в период ранних отказов (период приработки), сравнительно низкую и стабильную в период эксплуатации и возрастающую в период износа (примерно после 25 лет нормальной работы). Ранние отказы возникают, как правило, вследствие конструкторских и технологических недостатков. В нормальных условиях работы этот период длится до 1000 ч или примерно 6 недель. На окончании 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 ППИ:

- устранение причин отказов при изготовлении изделий путем изучения, усовершенствования производственного процесса и повышения контроля, то есть воздействие на процесс производства посредством обратной связи передачи информации и создание 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.

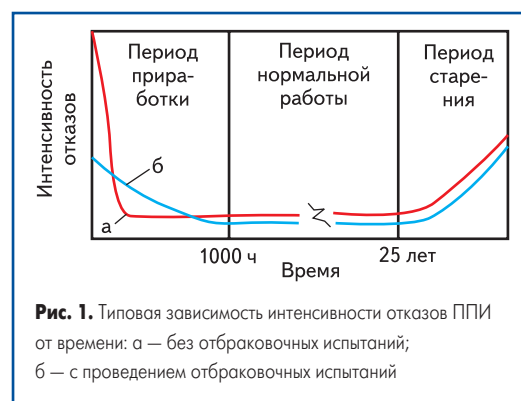


Рис. 1. Типовая зависимость интенсивности отказов ППИ от времени: а — без отбраковочных испытаний; б — с проведением отбраковочных испытаний

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 на этапе выходного контроля этих партий на заводе-изготовителе.

Считается, что случайных отказов ППИ не бывает, каждый отказ имеет причину и является следствием приложения некоторой нагрузки. «Слабые» ППИ, которые остались невыявленными к началу эксплуатации, могут стать причиной отказов РЭА. 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 (рис. 1).

В таблице 1 даны характеристики отдельных видов отбраковочных испытаний, их преимущества и недостатки. Многие различные по природе слабые места приводят к одним и тем же механизмам отказов, многие одинаковые механизмы отказов ускоряются различными нагрузками и многие различные механизмы отказов — одними и теми же нагрузками. В частности, работа ИС при повышенной температуре и термоциклы ускоряют многие механизмы отказов. Повышенные температуры ускоряют химические реакции, ведущие к усилению коррозии, старению, ухудшению изоляции, способствуют снижению пробивного напряжения, растрескиванию пластмассы, увеличению токов утечки. Процессы, приводящие к отказам, ускоряются при по-

Таблица 1. Механизмы отказов, выявляемые при отбраковочных испытаниях ИС

Отбраковочные испытания	Механизмы отказов									
	Дефекты монтажа кристалла	Дефекты в кристалле кремния	Дефекты металлизации кремния	Дефекты в сварных внутренних соединениях	Загрязнения поверхности	Дефекты герметичности	Дефекты корпуса	Дефекты внешних выводов	Несоответствие тепловых коэффициентов расширения	Электрическая нестабильность
Внешний осмотр										
Повышенная температура										
Вибрация										
Одиночные удары										
Многочисленные удары										
Центрифуга										
Термоциклы										
Испытания на герметичность										
Рентгеноскопия										
Термоэлектротренировка										
Энергоциклы										
Электрические испытания										
Повышенная влажность										

Таблица 2. Классификация основных механизмов отказов при повышенной температуре

Механизм отказа	Значение E_a , эВ	Характер проявления (вид) отказа
Зарядовая нестабильность в слое окисла и на границе окисла с полупроводником	0,7–1,4	Увеличение и нестабильность токов утечек, изменение коэффициента усиления транзисторов, уменьшение пробивных напряжений
Электрической пробой	0,7–1,4	Резкое уменьшение пробивных напряжений
Взаимодействие металлизации с полупроводником на границе	0,9–1,1	Увеличение обратных токов, уменьшение коэффициента усиления транзисторов
Образование интерметаллических соединений	0,65–1,5	Нарушение (обрыв) контактных соединений

вышении температуры по экспоненциальному закону вида:

$$K_y = \exp \frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{пер}} - \frac{1}{T_{пер.н}} \right),$$

где E_a — энергия активации дефекта; k — постоянная Больцмана; $T_{пер}$ — температура перехода; $T_{пер.н}$ — температура перехода повышенная.

В таблице 2 представлены механизмы отказа и характер его проявления при ускоряющем факторе — повышенной температуре.

Термоциклы (попеременный нагрев и охлаждение) также являются ускоряющим воздействием и хорошо выявляют относительно малые негерметичности корпуса. Влага проникает при термоциклах в негерметичные объемы и вызывает увеличение токов утечки и коррозию. Напряженные места конструкций, склонные к трещинообразованию, также выявляются при термоциклах.

Диапазон изменений температуры при термоциклах (используются, как правило, диапазоны 0...+55 °С, -65...+125 °С, -65...+150 °С и др.), количество термоциклов, длительность пребывания при крайних температурах, скорость изменения температуры выбираются разными; они по-разному воздействуют на интенсивность отказов изделий. Испытания термоциклами не являются неразрушающими; они не только вызывают отказы ППИ со слабыми местами, но могут вызывать снижение конструктивных запасов ППИ. В частности, термоциклы могут вызывать растрескивание кристаллов ИС, отделение кристалла от подложки, обрыв внутренних

соединений. Поэтому введение в систему входного контроля испытаний термоциклами следует проводить после предварительных проверок их целесообразности и эффективности для конкретных ППИ. При этом испытания термоциклами могут рассматриваться как ускоренные, следует только выбрать правильно диапазон изменения температуры и скорость ее изменения. В большинстве же случаев термоциклы являются нормальным режимом работы ППИ в аппаратуре, так как они связаны с разогревом помещений, в которых располагается аппаратура и т. п.

Помимо тепловых и термоциклических испытаний используются механические испытания с постоянной или изменяющейся нагрузкой, которые в основном могут выявлять дефекты монтажа кристалла, внутренних сварных соединений, корпуса и внешних выводов.

Тренировка

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 ППИ и предназначается для «выжигания» ранних отказов, то есть отбраковки потенциально ненадежных устройств и повышения надежности партии. Следовательно, выдержавшие тренировку устройства имеют более низкую и постоянную частоту отказов, что значи-

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

Считается, что тренировка в подобранном для конкретного типа ППИ 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 ППИ. Прежде всего, необходимо добиться, чтобы при проведении тренировки ППИ 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 и ее режимов следует относиться очень внимательно, с тем чтобы избрать наиболее оптимальный режим (в том числе по времени и стоимости), позволяющий с наибольшим процентом отбраковать потенциально ненадежные ППИ и в то же время не вызывать появления новых дефектов, показывающих, что идет процесс снижения долговечности изделий.

Электротренировка

Электротренировка ПП и ИС (или испытания на принудительный отказ) является эффективным и вместе с тем дорогим методом. Она 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, обеспечить такие эквивалентные условия испытаний, которые позволили бы свести к минимуму отказы оставшихся изделий при эксплуатации РЭА.

ЭТ ППИ может проводиться следующими методами в режимах:

- статическом с обратным смещением переходов;
- статическом с прямым смещением переходов;
- динамическом с последовательным или параллельным возбуждением;
- кольцевого генератора;

• энергоциклирования, то есть в режиме «включено-выключено».

Методы тренировки различных ППИ в принципе похожи, но значительно отличаются в деталях.

Большая эффективность тренировки с обратным смещением, обнаруженная первоначально при испытаниях транзисторов, вызвала желание так же поступать и с ИС. Однако в ТТЛ ИС при воздействии отрицательного смещения примерно половина полупроводниковых переходов оказывается смещенной в обратном направлении, а другая половина — в прямом.

При тренировке приборов с прямым смещением температура $p-n$ -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 среды выбирается равной 80–150 °С (то есть обязательно необходима тренировка при повышенной внешней температуре).

Тренировка отдельных линейных ИС и МДП ИС, в которых возможны поверхностные дефекты, выполняется в режиме обратного смещения. Логические ИС обычно тренируют в режиме, когда все схемы переключаются с большой скоростью, для чего применяется 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. Выбор между статическим и динамическим режимами тренировки часто вызывает затруднения, так как каждый из них имеет преимущества и недостатки в ускорении отказов, вызываемых:

- ионными загрязнениями или другими дефектами, приводящими к отказам вследствие миграции зарядов;
- дефектами кремния или окисла типа точечных «проколов»;
- 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-SiO₂.

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. Отказы, обусловленные случайными изолированными дефектами (точечными проколами), по-видимому, 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 испытываемого 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 и экономические аспекты.

Выгоды, получаемые при считывании выходных сигналов испытываемых ППИ во время тренировки, заставили производителей ИС проводить эксперименты с использованием систем TDBI (test during burning in — тестирование одновременно с электротренировкой). Некоторые из них внедрили эти системы для отбраковки в производственных условиях, а также для исследований с целью обеспечения качества и 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 регенераций динамических ЗУПВ и др.

Исследования показали, что внедрение системы тестирования одновременно с ЭТ привело к сокращению времени, затрачиваемому на тренировку, на 85% для динамических ЗУПВ емкостью 64 К.

Кроме того, данные о неисправностях, полученные с помощью системы TDBI, 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 выход годных ППИ означал снижение затрат на производство одного изделия.

Из рис. 2 видно, что по мере работы по системе TDBI на ЗУПВ с емкостью 64 К и в результате принимаемых на основании полученной информации мер по снижению конструктивных и технологических дефектов стало возможным снизить время тренировки с 96 до 24 ч с одновременным снижением количества отбракованных изделий с 4 до 1,5%.

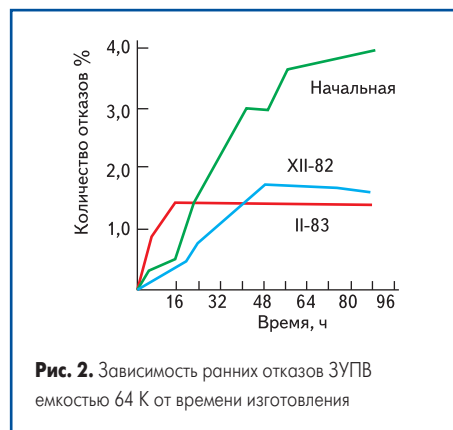


Рис. 2. Зависимость ранних отказов ЗУПВ емкостью 64 К от времени изготовления

Некоторые отказы могут быть выявлены только с помощью системы TDBI, например перемежающиеся или случайные сбои ЗУ, вызываемые воздействием альфа-частиц. Эта система позволяет точно установить, в какой момент произошло нарушение контактирования изделий или замыкание в гнезде печатной платы. Фирма IBM сообщила, что система TDBI дополнительно отбраковывала до 20% от всего количества отказов по причине восстановления параметров после изъятия изделия из испытательного стенда тренировки. В этом же сообщении говорится, что около 10% ППИ, проходящих стандартную динамическую тренировку, фактически избегают ее из-за неконтактирования. Правильно проводимая тренировка с использованием системы TDBI может снизить отказы РЭА в эксплуатации для ППИ, серийно выпускаемых длительное время, в 2 раза и в 11 раз — для новых изделий.

Электротренировка

Большинство механизмов отказов ППИ ускоряется под воздействием температуры и напряжения или тока, поэтому в процессе тренировки изделия должны работать при максимально допустимом напряжении и максимально возможной температуре. Однако при этой температуре не должно быть тепловой перегрузки, изменений логических состояний или недопустимо большой плотности тока в металлизации. Тепловая перегрузка должна быть исключена, так как в противном случае температура полупроводникового перехода не поддается контролю, что приводит к быстрому отказу изделия.

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

Для ЭТ могут использоваться те же методы, что и для электротренировки, плюс внешнее воздействие повышенной температуры. Температуры, при которых проводятся тренировки, составляют 70, 85, 100, 125 и 150 °С. ЭТ ведется в специальных стендах при строгом контроле температуры.

Таблица 3. Результаты тренировки МОП ЗУ с произвольной выборкой в статическом режиме

Тип корпуса	Температура окружающей среды, °С	Длительность ЭТТ, ч	Число партий	Общее число приборов	Процент отказов
Пластмассовый	85	16	59	33488	3,2
Герметичный	85	16	8	6720	1,5
Герметичный	125	48	20	16993	2,3
Герметичный	125	168	14	8963	2,3

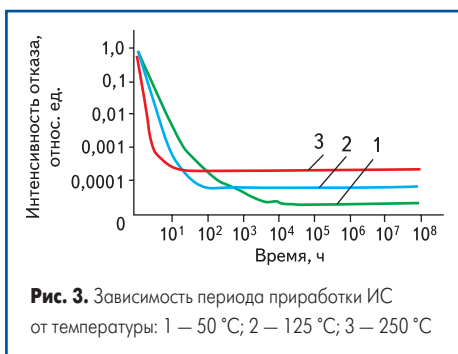
Кремниевые ИС, особенно линейные, могут подвергаться дополнительной тренировке с использованием обратного смещения при высокой температуре.

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 устройств с дефектами поверхности, которые проявляются в виде токов утечки или уменьшения быстродействия. ЭТТ в динамическом режиме выявляет дефекты ячеек ЗУ на МОП-транзисторах, обусловленные плохим качеством.

Наибольшее распространение получила ЭТТ МОП БИС в статическом режиме на уровне устройств, когда на все входы и выходы схемы подается напряжение определенного уровня. Некоторые фирмы применяют данный вид тренировки совместно с тренировкой в динамическом режиме, проводимой на уровне плат или систем. В таблице 3 приведены результаты ЭТТ в статическом режиме МОП ЗУ, выпускаемых одним из изготовителей БИС. Различие в частоте отказов приборов в герметичных и пластмассовых корпусах объясняется большим числом случаев пробоя затвора в последних, которые более чувствительны к статическим зарядам, чем приборы в герметичных металлических корпусах.

Многие фирмы проводят ЭТТ при температурах до 300 °С. Установлено, что при повышенных температурах постоянное значение интенсивности отказов достигается в течение более короткого времени, чем при более низких температурах (рис. 3).

В процессе отбраковки ИС 30-часовая 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 также не поддаются контролю при тренировке.



Было проведено сравнение эффективности отбраковки потенциально ненадежных ИС серии 106 в процессе ЭТТ на частотах 3 МГц и 50 Гц (схема параллельного возбуждения). Для эксперимента взяты четыре партии схем по 1400 шт. типа 106 ЛБ1. На первой и третьей партиях проведена ЭТТ сначала в одном режиме в течение 168 ч, затем в другом режиме. На второй и четвертой партиях проведена ЭТТ только в одном из этих режимов, а затем на выборке объемом 50 шт. схем от каждой партии проведены испытания на надежность в течение 500 ч. Результаты испытаний указанных четырех партий приведены в таблице 4.

Анализ отказавших ИС показал, что имеются дефекты на кристалле (царапина, постороннее включение на коллекторе транзистора, перетравливание металлизации).

Полученные данные, сложность изготовления и эксплуатации стенов для проведения ЭТТ на частоте 3 МГц способствовали принятию следующего решения: проводить технологическую ЭТТ ИС серии 106 по схеме с параллельным возбуждением при температуре 125 °С, предельно допустимой величине напряжения питания 5,5 В и максимальной эквивалентной нагрузке $R = 330 \text{ Ом} + 5\%$ и $C = 510 \text{ пФ} + 10\%$. При этом параметры запускающего импульса следующие: частота следования — 50 Гц, скважность — 2, длительность фронтов импульса — не более 20 мкс.

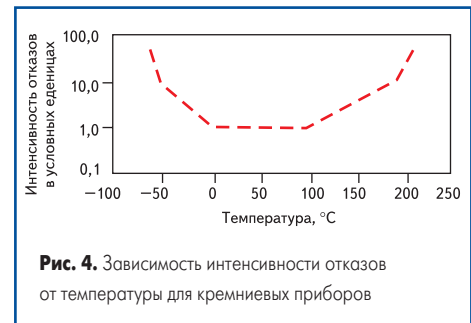
Термотренировка

Известно, что ряд недочетов конструкции и нарушений технологии при изготовлении ППИ может проявляться при испытаниях на хранение как при повышенных, так и при пониженных температурах. При повышенных температурах ускоряется диффузия примесей и загрязнений на поверхности полупроводника, увеличивается подвижность ионов в окисле, повышаются влагоотделение и газоотделение частями приборов, быстрее идет процесс старения сплавов, лучше выявляются механические напряжения. При пониженных температурах появляется воздействие термических напряжений на спай и на *p-n*-переходы изделия. Поэтому влияние температур сказывается и на значениях интенсивности отказов ППИ (рис. 4).

Проверено, что если процент отказов после ЭТТ составляет доли процента и более 90% отказов — по электрическим параметрам, то ЭТТ может быть заменена на термотренировку. Время термотренировки должно быть не менее времени ЭТТ, но температура воздействия должна быть выше температуры ЭТТ, то есть температура термотренировки должна быть равной температуре *p-n*-перехода

Таблица 4. Результаты ЭТТ на различных частотах ИС серии 106

Последовательность проведения испытаний	Количество отказов в партиях			
	1	2	3	4
ЭТТ в режиме:				
3 МГц, T = 100 °С, E _n = 5,5 В	2	1		
150 Гц, T = 125 °С, E _n = 5,5 В	1	—		
ЭТТ в режиме:				
50 Гц, T = 125 °С, E _n = 5,5 В			4	2
3 МГц, T = 100 °С, E _n = 5,5 В			0	—
Испытания на надежность в режиме				
50 Гц, T = 125 °С, E _n = 5,5 В	0	1	0	0



кристалла при ЭТТ. Практически это легко рассчитывается, так как в технических условиях на изделие дается значение теплового сопротивления «переход-среда».

Например, когда при ЭТТ ИС типа КР1005В11 в течение 72 ч при температуре 55 °С процент отказа достиг 0,3 (при этом отсутствовали катастрофические отказы), проведенная на 806 схемах проверка воздействия термотренировки в течение 72 ч при температуре 80 °С дала идентичные результаты.

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 ч, чтобы ускорить ухудшение параметров из-за химических процессов, вызванных поверхностными загрязнениями, или из-за нестабильности окисла.

Продолжительность тренировок

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

Итак, выбран оптимальный режим тренировки и необходимо найти оптимальное время тренировки. В настоящее время длительность ЭТТ различных схем в разных режимах составляет 48, 72, 96, 150, 168, 240 ч, а в отдельных случаях — до 1000 ч. По данным фирмы Fairchild Semiconductor, большинство отказов происходило в первые 96 ч. В большинстве национальных стандартов, а также в международных стандартах (публикации № 747 МЭК и № 9000 ИСО) устанавливаются объем и последовательность

проведения отбраковочных испытаний ИС, в которые включаются ЭТТ продолжительностью 168, 96 и 48 ч.

По последним данным, типичная температура для испытаний составляет 125 °С, а длительность испытаний при ЭТТ равна минимально 48 ч, максимально — 168 ч. Оптимальными с точки зрения экономической эффективности считаются 96 ч. Экспериментально подтверждается, что время ЭТТ для МДП ИС всегда больше, чем для биполярных схем. 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 температуре 150 °С в статическом режиме при обратном смещении для изделий повышенной надежности.

Практически время ЭТТ устанавливается при проведении неоднократных испытаний на партиях изделий, изготовленных в разное время, путем контроля электрических параметров через каждые 24 ч ЭТТ. Если, например, после 72 ч отказов не наблюдается, то время ЭТТ выбирается равным 96 ч, то есть определяется качеством изделий.

Анализ результатов испытаний показывает, что если более 50% отказов являются катастрофическими, то это свидетельствует о неуправляемости и нестабильности технологического процесса. Отказы в данном случае проявляются практически в первые 12 ч ЭТТ. При стабильном технологическом процессе изготовления ИС, когда количество отказов на ЭТТ менее 1%, более 90% отказов ИС происходит из-за ухода их электрических параметров за нормы, установленные в ТУ. Остальные отказы являются катастрофическими или не связанными с нарушением работоспособности ИС.

Анализ отказов ИС, имеющих выход электрических параметров за допуск, установленный в ТУ, показывает, что при перепроверке этих схем через 24, 36, 48 ч у части из них значения параметров начинают входить в допустимые. В большей степени это связано с нестабильностью поверхности полупроводника или окисной пленки из-за ионного дрейфа. Если эти ИС поставить заказчиком, то при работе в аппаратуре они откажут в первую очередь. Поэтому были введены следующие ограничения на время проверки партии ИС после проведения ЭТТ: замер электрических параметров следует начинать через 2 ч после изъятия ИС из нагретой камеры стенда ЭТТ и проверять всю партию не позднее 12 ч в зависимости от конструктивно-технологических особенностей ИС.

Когда механизмы отказов зависят от электрического поля и температуры, а не от плот-

ности тока или мощности, эффективным испытанием на отказ является испытание эквивалентным электрическим полем. Его, в частности, можно использовать для производственной тренировки ИС перед герметизацией при условии, что во время испытаний не возникает отказов с нетипичными механизмами.

Анализ надежности показал целесообразность тренировки части гибридных схем перед герметизацией. Достоинство такой тренировки состоит в том, что доработку можно производить без повреждений корпуса и внутренних элементов, возможных при вскрытии корпуса модуля.

Приведем пример разумного подхода к подбору режима тренировки. Результаты испытаний с целью выявления отказов, характерных для начального периода эксплуатации СППЗУ (стираемые программируемые постоянные запоминающие устройства) типа 2716 фирмы Intel, показывают, что среднее за год значение количества отказов для начального периода эксплуатации составляет 1%, причем большая их доля приходится на скачковую проводимость (67 отказов из общего количества 73). Для этих схем были разработаны две различные тренировки, направленные на выявление отказов начального периода эксплуатации: одна — для устранения изделий со скрытыми дефектами типа потери заряда, другая — для изделий с дефектами типа усиления заряда (оба эти дефекта свидетельствуют о наличии в окисле изделия проводимости скачкообразного типа). Общей задачей двух этих тренировок было снижение суммарной интенсивности отказов в области начальной эксплуатации до величин меньше 0,2% для всей совокупности изделий.

Выполненные работы по схемам типа СППЗУ показали, что потери заряда при температуре 150 °С оказываются на два порядка выше, чем при температуре 55 °С, поэтому в качестве основной тренировки по отбраковке этих изделий со скрытыми дефектами типа потери заряда была выбрана высокотемпературная тренировка.

Для определения оптимального времени термотренировки была первоначально применена к партии изделий, отсортированных по параметру «потеря заряда», причем в ходе такой пробной тренировки через каждые 20 ч производились измерения параметров изделий. Результаты этой тренировки показали, что для выявления большинства изделий с дефектами, приводящими к потере заряда, достаточно 72 ч (рис. 5).

С целью подтверждения этой временной оценки партия из 10 000 изделий типа 2716

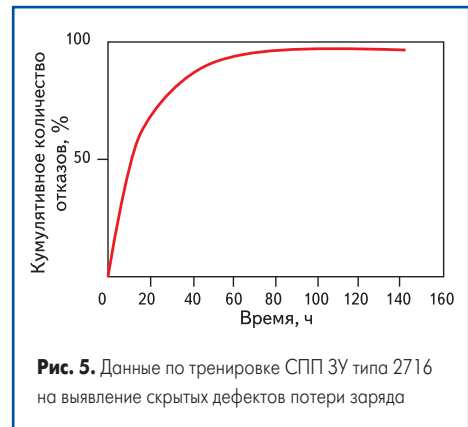


Рис. 5. Данные по тренировке СППЗУ типа 2716 на выявление скрытых дефектов потери заряда

была сначала подвергнута тренировке в течение 72 ч при температуре 150 °С, а затем в течение 48 ч прошла динамические испытания на принудительный отказ. Примерно 0,1% изделий, прошедших тренировку для выявления дефектов потери заряда, отказали при испытаниях на принудительный отказ.

Анализ данных по результатам тренировки

На предприятии-изготовителе ППИ, где для повышения надежности выпускаемой партии продукции подвергаются тренировке 100% изделий с целью отбраковки отказавших, одновременно получают большой фактический материал. Поскольку тренировка — это не что иное, как кратковременное испытание на срок службы, то, пользуясь этими данными, можно:

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

В таблице 5 перечислены некоторые механизмы отказов и методы испытаний, используемые для их вызова.

Как видно из таблицы, статическая ЭТТ вполне достаточна для некоторых типов ППИ, а динамическая ЭТТ годится для большинства изделий, в том числе для БИС и СБИС. Например, основным методом выявления дефектов окисла, некачественных контактов, дефектов структуры кристалла кремния является динамическая ЭТТ.

Таблица 5. Типичные механизмы отказов при различных методах испытаний

Механизм отказа	Тип отказа	Энергия активации отказа, эВ	Метод тренировки
Дефекты окисла	Ранний беспорядочный	0,3	Динамическая ЭТТ
Контакты	Ранний износ	0,6–0,8	Динамическая ЭТТ
Загрязнение	Ранний износ	1,4	Статическая ЭТТ
Дефекты структуры кристалла кремния	Ранний беспорядочный	0,3	Динамическая ЭТТ

Хотя для ускорения проявления дефектов окисла необходима динамическая ЭТТ, роль окисла в биполярных ИС значительно отличается от роли в МОП ИС. В биполярном транзисторе окисел кремния не является неотъемлемой частью схемы, скорее, точечный прокол в оксидном слое делает расположенный под ним кремний подверженным загрязнению, но сам по себе не вызывает катастрофического отказа. В МОП-транзисторе, однако, оксидный слой является неотъемлемой составной частью схемы. Дефект в оксидном слое ведет к полному пробую (размыканию или замыканию). В МОП-структурах ЗУ оксидные дефекты нарушают возможность накопления заряда оксидным слоем.

Ниже приведены данные о процентах отказов (табл. 6), встречавшихся в различных изделиях при проведении ЭТТ фирмой Emercen.

Заключение

Проведение отбраковочных испытаний при производстве ППИ, в том числе ИС, позволяет удалить из партии ППИ потенциально ненадежные изделия, что повышает надежность партии в целом. Электротренировка считается наиболее эффективным методом отбраковочных испытаний. Правильный подбор режима электротренировки и ее времени позволяет наиболее полно отбраковать потенциально ненадежные изделия.

Таблица 6. Данные о процентах отказов

Тип изделия	Процент отбраковки при ЭТТ
Вентильные КМОП ИС	4,56
КМОП ИС со средним уровнем интеграции (триггеры, счетчики)	3,68
Операционный усилитель (двойной 741)	2,57
Операционный усилитель (с полевыми транзисторами на входе)	15,79
Компаратор напряжения	9,08
Матрица транзисторов Дарлингтона	1,88