

Повышение качества электронных изделий по методике FMEA

В статье описан один из эффективных методов менеджмента качества — анализ видов и последствий потенциальных несоответствий (Failure Mode and Effect Analysis — FMEA), который позволяет выявить потенциальные дефекты изделий в ходе производства, определить их причины, оценить риски их появления и принять меры для устранения или снижения вероятности ущерба от отказа.

Леонид Ануфриев,
профессор

alp@integral.by

Наталья Ковальчук

7033696@mail.ru

Владимир Ланин,
профессор

vlanin@bsuir.by

Введение

Создание принципиально новой цифровой радиоэлектронной техники требует современных интегральных электронных компонентов, что позволяет значительно улучшить технические характеристики и повысить надежность аппаратуры. Отечественной электронной промышленностью освоен выпуск широкой номенклатуры новых изделий, обладающих расширенными функциональными свойствами, — микропроцессоров, микроэлектромеханических систем (МЭМС) и других.

Важнейшей задачей производства становится улучшение качества продукции и обеспечение ее безопасности для здоровья и жизни потребителей. В связи с этим появляется необходимость системного применения на предприятиях мероприятий, повышающих уровень безопасности при изготовлении продукции. Ведь большинство дефектов изделий возникает именно в технологических процессах вследствие сложности их организации и устройства.

Одним из наиболее эффективных методов менеджмента качества является анализ видов и последствий потенциальных несоответствий. В настоящее время до 80% разработок изделий и технологий проводится с применением FMEA-методологии. По сравнению с более чем полувековой историей развития методо-

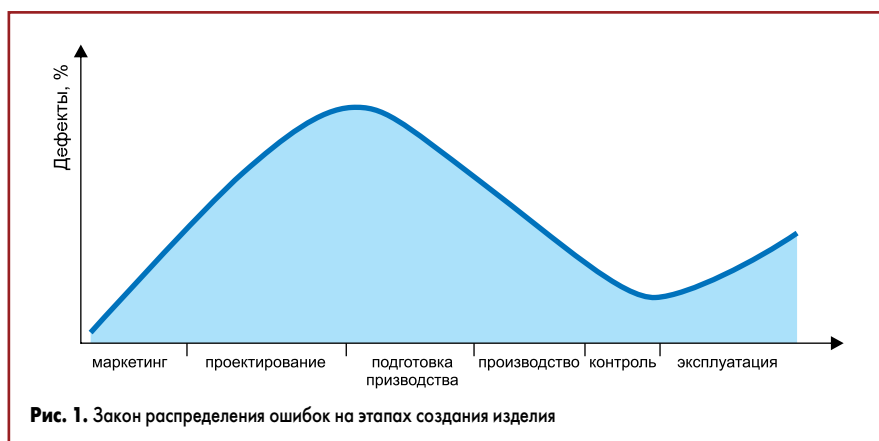
логии FMEA в зарубежных странах, отечественная практика исчисляется лишь двумя десятилетиями [1]. Метод FMEA появился в США в середине шестидесятых годов и впервые был использован при проектировании космического корабля «Аполлон», а затем в медицине и ядерной технике. В 1980-е годы метод получил дальнейшее развитие под названием FMEA и нашел применение в автомобильной и других отраслях промышленного производства США, а потом в Европе и Японии. В некоторых областях промышленности метод стал основой обеспечения качества [2].

Метод позволяет проанализировать потенциальные дефекты, их причины и последствия, оценить риски их возникновения на предприятии и принять меры для устранения или снижения вероятности ущерба от появления отказа. Это один из наиболее эффективных способов доработки конструкции технических объектов и процессов их изготовления на важнейших стадиях жизненного цикла изделия.

Цель большинства методов менеджмента качества — устранение фактических несоответствий за счет корректировки параметров технологических процессов с использованием математической статистики. Такие методы не учитывают возможности появления потенциальных, ранее не проявлявшихся отказов, они сложны в реализации на предприятии. Известно, что в 80% случаев ошибки возникают на этапах проектирования и подготовки производства (рис. 1). Это свидетельство того, что на данных этапах технологические процессы должны быть максимально тщательно проанализированы, чтобы заранее определить места возможного проявления отказов.

Наиболее эффективным способом устранения несоответствий становится предупреждение их появления. Предупреждающие действия, в отличие от корректирующих, направлены на предотвращение потенциальных несоответствий. Они являются одним из наиболее важных компонентов менеджмента качества, так как позволяют своевременно принимать меры, препятствующие возникновению несоответствий, а не исправлять уже случившиеся.

Метод FMEA как раз построен на принципе обнаружения несоответствий на самой ранней стадии



проектирования. FMEA следует осуществлять либо до появления несоответствия, либо немедленно после выявления несоответствия или причин, приводящих к его появлению, чтобы не допустить последствий или максимально снизить их риск.

Подтверждается рациональность использования подобного анализа и с точки зрения экономики. Известно правило десяти раз А. Фейгенбаума: затраты на исправление дефекта уделяются на каждом следующем этапе жизненного цикла продукции. Например, если расходы на входном контроле комплектующих и материалов принять за одну условную единицу, то на выходном контроле изделия они составят 10 единиц, а устранение дефекта изделия при его применении заказчиком — 100 единиц [3].

Издержки на проведение анализа и внедрение необходимых действий при разработке процессов и подготовке производства значительно ниже, чем затраты на аналогичные действия при серийном выпуске, осуществляемые по факту обнаружения несоответствий. Метод FMEA не анализирует сами экономические показатели, а позволяет выявить дефекты с максимальным риском, оценить их потенциальные причины и последствия и принять необходимые меры еще до того, как этот дефект может быть обнаружен, тем самым уменьшить затраты на устранение отказа.

Методология FMEA позволяет оценить риски и возможный ущерб, вызванный потенциальными несоответствиями конструкции и технологических процессов, на самой ранней стадии проектирования и создания готового изделия или его комплектующих. FMEA-анализ предусматривает систематизированный комплекс действий:

- создание алгоритма методики анализа и обнаружения потенциальных отказов в процессе производства;
- создание ранжированного ряда видов и причин несоответствий для планирования корректирующих и предупреждающих действий;
- разработку комплекса мероприятий для устранения причин наиболее критических потенциальных дефектов в технологическом процессе;
- разработку итогового протокола по технологическим операциям с анализом потенциальных видов, последствий и причин возникновения отказов;
- проверку адекватности разработанных мероприятий для минимизации дефектов;
- документирование результатов анализа для накопления в базе знаний.

Методология FMEA

В методологии FMEA применяют следующие статистические инструменты анализа качества:

- причинно-следственные диаграммы Исикавы;
- контрольные листки;
- гистограммы;
- диаграммы разброса;
- диаграммы Парето;

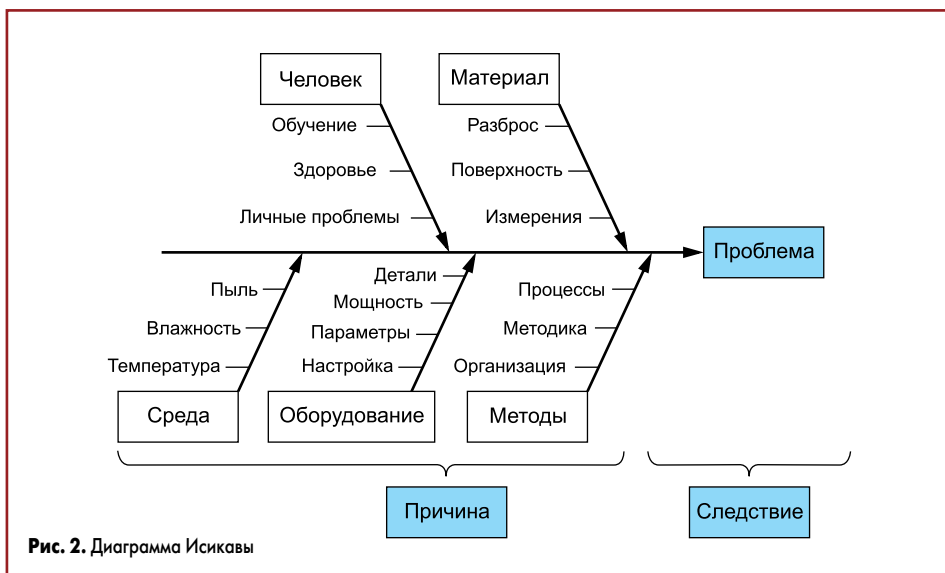


Рис. 2. Диаграмма Исикавы

- группировку данных по общим признакам;
- графики и контрольные карты.

На диаграмме Исикавы графически отображаются взаимосвязи между решаемой проблемой и причинами, влияющими на ее возникновение, что дает возможность выявить ключевые параметры процессов, оказывающие воздействие на характеристики изделий, установить причины проблем процесса или факторы, приводящие к возникновению дефекта в изделии. В диаграмме возможные причины дифференцированно разделяются по своему влиянию на пять основных: человек, машина, методы, материал, окружающая среда (рис. 2). В свою очередь каждая из этих пяти причин может быть разделена на более подробные, а те соответственно разбиваются на еще более мелкие [4].

Контрольный листок представляет собой форму для регистрации и подсчета данных, собранных в результате измерений контролируемых показателей в течение установленного периода. Полученные сведения могут быть как целочисленными (например, количество дефектов), так и интервальными (в частности, диапазон значений измерений). Назначением контрольного листка является представление информации в удобном для восприятия виде. Он показывает, как часто возникают те или иные события, поэтому информация контрольного листка является более систематизированной, чем обычный сбор данных. По форме контрольный листок представляет собой, как

правило, таблицу, сопровождающую процесс или объект и содержащую данные контроля. В таблице уже определены типы несоответствий, которые могут возникнуть в объекте, и предусмотрено место для заполнения количества обнаруженных несоответствий.

В ходе проверочной операции контролер отмечает с помощью простых символов каждое выявленное несоответствие в виде штрихов. Такой принцип сбора данных предусматривает минимальные действия контролера при регистрации несоответствий, что сокращает количество возможных ошибок, связанных со сбором информации [5].

Гистограмма является графическим представлением статистических данных в виде столбчатой диаграммы. Она отображает распределение отдельных измерений параметров изделия или процесса. Важное преимущество гистограммы — наглядное представление тенденции изменения измеряемых параметров качества объекта и зрительная оценка закона их распределения (рис. 3).

Диаграмма разброса представляет инструмент качества, предназначенный для выявления зависимости между двумя типами данных. С ее помощью можно определить корреляцию между параметром качества и влияющим на него фактором.

Диаграмма Парето — столбчатая диаграмма, на которой интервалы (столбики) упорядочены по нисходящей линии. На такой диаграмме интервалы могут представлять виды

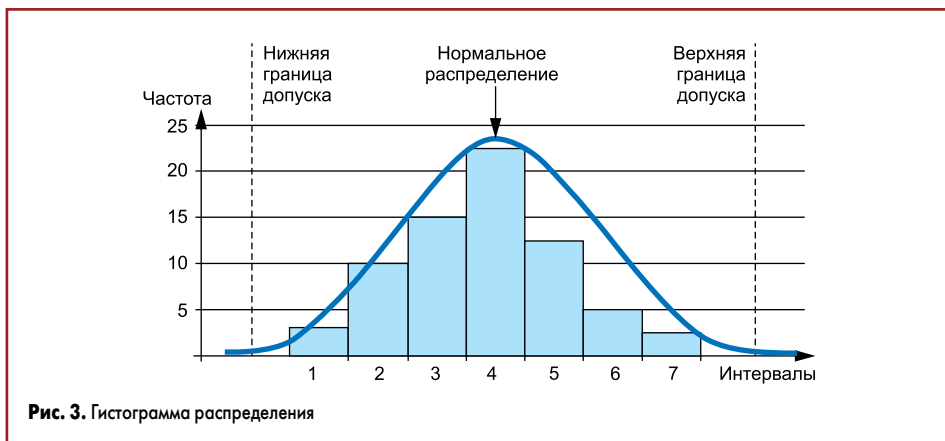
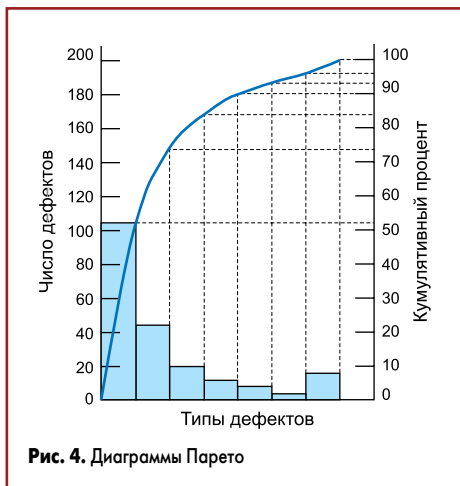


Рис. 3. Гистограмма распределения


Рис. 4. Диаграммы Парето

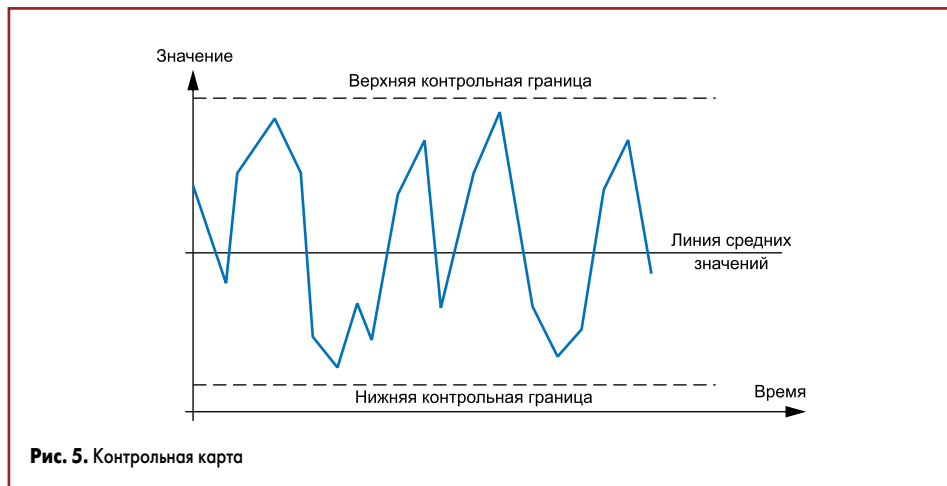
дефектов, их локализацию, ошибки и прочее; высота интервалов (высота столбиков) — частоту возникновения дефектов, их процентное соотношение, стоимость, время и т. д. Диаграмма Парето является графическим отображением правила Парето, которое гласит, что значительное число несоответствий и дефектов возникает из-за ограниченного числа причин. Если применить это правило по отношению к дефектам, то окажется, что 80% дефектов возникает из-за 20% причин [1].

Используется диаграмма Парето при выявлении наиболее значимых факторов, влияющих на возникновение несоответствий или брака. Это дает возможность установить приоритет действиям, необходимым для решения проблем. Диаграмма Парето, применительно к обнаружению дефектов, может быть представлена в виде, приведенном на рис. 4.

Контрольная карта — это линейчатый график, построенный на основании данных измерений показателей процесса в различные периоды времени. Он позволяет отразить динамику изменений показателя и за счет этого контролировать процесс. Контрольные карты отличаются от обычных линейчатых графиков только дополнительно нанесенными горизонтальными линиями, которые обозначают верхнюю и нижнюю контрольную границу статистически допустимых изменений измеряемой величины и среднее значение всех измерений (рис. 5). Точки, наносимые на контрольные карты, могут быть как результатом прямых измерений отдельного показателя процесса, так и суммарным (комплексным) значением группы показателей, полученных в один момент времени. Комплексный показатель может включать, например, среднее значение по группе измерений, среднее значение отклонений, процент дефектов, среднее число дефектов на единицу и т. п.

Контрольные границы определяют предел ожидаемых изменений процесса, когда действуют только наиболее типичные для этого процесса факторы. Наносятся контрольные границы на расстоянии трех стандартных отклонений случайной величины от линии средних значений.

ФМЕА начинается с составления карты потока технологического процесса, которая должна идентифицировать его характеристики по каждой операции.


Рис. 5. Контрольная карта

На первом этапе проводится формирование рабочей команды. В ее состав входят представители производственного или технологического отдела, а также привлекаются специалисты, ответственные за разработку конструкции изделия, за материалы, комплектующие, качество обслуживания поставщиков. Для эффективной работы число участников не должно превышать от четырех до восьми человек.

На втором этапе перед проведением FMEA команда экспертов осуществляет сбор и изучение исходных данных. Исходные сведения для анализа FMEA-процесса должны содержать информацию о продукции, требованиях, предъявляемых к системе в целом и ее составляющим, факторах окружающей среды. На данном этапе формируются технологические операции для последующего проведения анализа видов, последствий и причин потенциальных несоответствий, которые выбирают по определенным критериям. При выборе технологических процессов используют следующие критерии:

- технологический процесс является новым (более 50% новых операций);
- в процессе формируются параметры, влияющие на безопасность продукции;
- обнаружены несоответствия в конструкции изделия, к которому относится техпроцесс;
- применяется новое или модернизированное оборудование, оснастка, инструмент;
- произошло изменение технологии либо методов контроля;
- изменены графики ремонта и обслуживания оборудования, применяемого в техпроцессе, а также проверки, калибровки, аттестации и ремонта средств измерения, используемых в техпроцессе.

На третьем этапе команда экспертов определяет виды потенциальных несоответствий процесса, их последствий и возможных причин появления. Для конкретного процесса и конкретной операции перечисляются все виды потенциальных отказов. Делается предположение, что отказ может возникнуть, но не обязательно. Список несоответствий должен быть полным, но в него не следует включать несоответствия, возникновение которых невозможно или слишком маловероятно. При поиске видов несоответствий исходят из следующих предположений:

- частичное невыполнение операции;
- неправильное выполнение операции (например, разброс материалов по толщине);

- выполнение непредусмотренных или вредных действий (например, загрязнение на поверхности и др.).

Последствия потенциальных отказов определяются их влиянием на функциональные характеристики изделия и их восприятие потребителем. Возможные причины потенциальных отказов определяются на основе анализа содержания операций, требований к ним, а также изучения прошлых трудностей, связанных с анализируемым процессом. Причины следует описывать через факторы, которыми можно управлять или корректировать. Описание должно быть точным и полным для того, чтобы выработать эффективные рекомендации.

На четвертом этапе выполняют экспертный анализ потенциальных отказов, последствий и их причин. Каждый дефект и причину дефекта оценивают экспертно по следующим критериям: значимость (S); возникновение (O) и обнаружение (D).

Значимость — это оценка серьезности последствия потенциального отказа для следующей операции, подсистемы, системы или для потребителя. Значимость применима только к последствию. Снижение ранга (количественной оценки) значимости последствия может быть достигнуто только через изменение процесса. Значимость оценивают по шкале от 1 до 10 [6].

Возникновение — степень возможности возникновения конкретных причин отказа, которая описывается также ранговым числом. Степень возможности возникновения причины потенциального отказа оценивается по шкале от 1 до 10.

Обнаружение — это оценка способности обнаруживать потенциальную причину (слабость процесса) или следующий вид отказа прежде, чем процесс внедрен в производство. Чтобы достичь низшего ранга в общем, следует усовершенствовать управление процессом. Вероятность обнаружения причины потенциального отказа оценивается по шкале от 1 до 10.

На пятом этапе производится вычисление приоритетного числа риска (ПЧР) — это произведение значимости S, возможности появления O и обнаружения D:

$$\text{ПЧР} = S \times O \times D. \quad (1)$$

ПЧР является показателем риска изготовления, и его значение следует использовать для ранжирования по порядку трудностей разработки в виде диаграммы. ПЧР может иметь значение от 1 до 1000.

На шестом этапе, когда виды отказов проанжированы по ПЧР, направляют усилия на снижение любого из показателей: вероятность появления, значимость и обнаружение. Усиление контроля приведет к уменьшению только показателя обнаружения. Возможность появления можно снизить только устранением или управлением большим количеством причин видов отказа путем пересмотра процесса, что может дать снижение значимости.

Возможны следующие действия:

- планирование эксперимента (когда много причин и они взаимосвязаны);
- пересмотр плана испытаний;
- пересмотр процесса;
- пересмотр условий проведения процесса.

Для приоритетного числа риска устанавливается критическая граница ПЧР_{гр}, которая принимается равной 100.

На седьмом этапе для каждого дефекта или причины с ПЧР, превышающим ПЧР_{гр}, команда должна прилагать усилия к снижению этого расчетного показателя посредством доработки процесса в результате реализации корректировочных мероприятий. После того как корректирующее действие определено, оцениваются полученные показатели. Сравнивая новое ПЧР и ПЧР граничное, принимается решение о признании корректировочных мероприятий. Если не удалось его снизить до приемлемых пределов (среднего риска ПЧР, значение которого не более 100), разрабатываются дополнительные корректировочные мероприятия и повторяются предыдущие шаги.

Минимизация дефектов в производстве изделий электронной техники

Объектом исследований выбрана микросхема серии KP1181EHXX (стабилизатор напряжения), прототип — 78LXX. Выводы ИС должны выдерживать растягивающие усилия и изгибы, допускать сварку и пайку. Показатели технологичности конструкции должны соответствовать ГОСТ 14.201-73. Масса микросхемы не более 1,5 г. Технические данные:

- выходное напряжение — не более 24 В;
- входное напряжение — не более 30 В;
- выходной ток — не более 100 мА;
- рассеиваемая мощность — 0,625 Вт;
- погрешность выходного напряжения и выходного тока — не более 5%;
- корпус изделия — ТО-92 (КТ-26);
- необходима функция защиты от перегрева и короткого замыкания.

Технологический маршрут изготовления микросхемы KP1181EHXX состоит из 107 операций и включает комплексы подготовительных процессов, процессов групповой и индивидуальной обработки (рис. 6).

В комплекс подготовительных процессов входят: инженерное проектирование, разра-

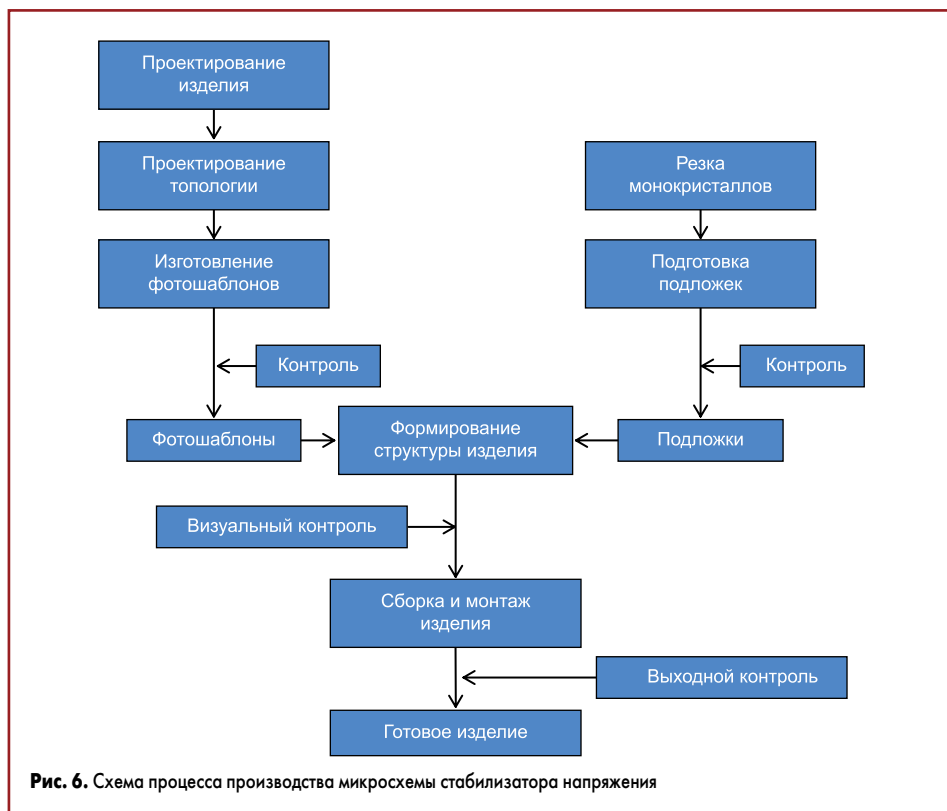


Рис. 6. Схема процесса производства микросхемы стабилизатора напряжения

ботка топологии и комплекта фотошаблонов, а также ряд заготовительных операций — подготовка полупроводниковых подложек, корпусов приборов и др. Формирование структуры прибора происходит при групповой обработке, которая состоит из ряда технологических операций (окисление, диффузия примесей, эпитаксия, фотолитография и др.). Этап сборки и монтажа начинается после завершения групповой обработки полупроводниковых пластин по планарной технологии и включает:

- разделение групповой пластины на кристаллы;
- монтаж кристаллов в корпусах;
- разварку выводов;
- герметизацию;
- контроль, тестовые испытания;
- окраску, маркировку и упаковку.

Планный и фактический выход годных изделий по участкам изготовления и сборки отражен в таблице 1.

Таблица 1. Показатели выхода годных изделий

Участок производства	Планный выход годных изделий, %	Фактический выход годных изделий, %	Δ, %
Изготовление структуры	95	94,4	-0,6
Сборка и монтаж	98	98,7	0,7

В соответствии с данными таблицы 1 целесообразно минимизировать потенциальные отказы только на участке изготовления кристалла микросхемы. Для последующего анализа видов и последствий потенциальных отказов были выбраны технологические операции, приведенные в таблице 2.

В качестве первого шага проводился анализ проблем, возникших до проведения исследования. К примеру, в таблице 3 наглядно отражено, что в ходе проведения операции

«Фотолитография» основные потери составили 29 пластин.

Следовательно, так как уже данные виды дефектов имели место в технологии, то они были включены в рассмотрение FMEA-командой. В таблице 4 представлены критерии оценки технологических операций, по которым оцениваются потенциальные виды дефектов.

Для всех выявленных видов потенциальных дефектов и их причин определяют их последствия на основе опыта и знаний FMEA-команды. При выявлении последствия и причин потенциальных дефектов применяем критерии оценки, приведенные в таблице 4. Возможные последствия потенциальных несоответствий определяются с учетом замечаний потребителей и назначения продукции.

На этом этапе особое внимание уделялось потоковой карте процесса (маршруту изготовления микросхемы), поскольку выявленный отказ может вызвать цепочку отказов последующих операций, а причиной быть предыдущая операция. К примеру, в технологической операции химической обработки пластин потенциальные последствия во многом связаны с последующими операциями. Так, загрязнение на поверхности пластин вызовут нарушение режимов диффузии, что приведет к формированию дефектной продукции. Также будет нарушена прочность связи пленки с подложкой или другой пленкой (адгезия) из-за существующих загрязнений, царапин.

При создании фоторезистивной копии дефекты могут привести к растраву окисла при последующих операциях диффузии, то есть к большим погрешностям размеров. Важно соблюдать режимы проведения фотолитографии (проявление, совмещение, экспонирование), чтобы не допустить ухода линейных размеров от номинала. Появление растравов в пленке связано с нарушением времени

Таблица 2. Технологические операции, рассматриваемые в процессе FMEA-анализа

Наименование технологической операции	Назначение технологической операции	Причина выбора для проведения анализа FMEA-процесса
Химическая обработка пластин	Удаление загрязнения с поверхности пластин перед диффузионными процессами и перед напылением металлов.	Проводится многократно. Особые требования к чистоте пластин: без грязевых пятен, полос и подтеков.
Окисление SiO ₂	Создание пленки SiO ₂ на поверхности пластин в качестве маски для фотолитографии, диффузии.	Проводится многократно. После окисления определяют толщину SiO ₂ .
Фотолитография	Создание защитного рельефа на поверхности пластины.	Проводятся многократно. Применена новая установка совмещения и экспонирования ЭМ-576.
Травление SiO ₂	Удаление нарушенных приповерхностных слоев.	Изменена технология травления. Время травления уменьшилось с 8 мин до 4–6 мин.
Диффузия бора (загонка)	Создание диффузионной области p-типа, изолирующей элементы интегральных схем. Создание слоя «разделение».	Диффузия проходит из слоя жидкого стекла. Закон распределения примеси представляет собой функцию Гаусса (внедрение SPC-контроля). Контроль по ВАХ-1 после формирования слоя.
Разгонка базы	Перераспределение примесей и формирование активных и пассивных областей. Создание слоя «база».	Требование к глубине диффузионного слоя 2,4±0,24 мкм. Контроль по ВАХ-2 после формирования слоя.
Диффузия фосфора в эмиттер	Формирование эмиттерных областей n'-типа. Создание слоя «эмиттер».	Диффузия проходит из слоя жидкого стекла. Слой стекла защищает поверхность кремния от испарения и попадания посторонних частиц. Закон распределения примеси представляет собой функцию Гаусса (внедрение SPC-контроля). Контроль по ВАХ-3 после формирования слоя.
Напыление металла (Al-Si)	При создании металлической разводки напыляют пленку алюминия толщиной 1,4 мкм.	Даны рекомендации анализа несоответствий конструкции.
Плазмохимическое осаждение (ПХО)	Создание на поверхности пластины защитного слоя ПХО, маскирующего p-n-переходы и защищающего микросхему от внешних воздействий.	Плазмохимическое осаждение протекает в плазме ВЧ-разряда. Опасные условия труда.
Плазмохимическое травление	Вскрытие контактных площадок в металлизации.	Процесс протекает в плазме ВЧ-разряда. Опасные условия труда.
Нанесение липкой ленты	Защита планарной стороны пластины перед шлифовкой.	Большой процент выхода негодных пластин приводит к экономическим потерям.
Механическое утонение пластин	Снятие излишков кремния до вскрытия окисной пленки.	Необходимость снижения толщины пластины с 280 до 240 мкм в связи с развитием планарной технологии. Заключительный блок техпроцесса, отрегулированный по ВАХ. Не допускается появления бракованных изделий.
Снятие липкой ленты	Снятие защитной пленки после шлифовки.	Большой процент брака приводит к экономическим потерям. Особые требования к процессу.

Таблица 4. Критерии оценки технологического процесса изготовления микросхемы KP1181ENXX

Технологическая операция	Критерии оценки
Химическая обработка пластин	Допускается не более трех светящихся точек перед окислением, не более десяти точек перед диффузией, не более десяти точек перед пассивацией; поверхность должна быть без разводов и подтеков; допускается наличие царапин в количестве не более трех штук и суммарной длиной не более четверти диаметра подложки.
Окисление SiO ₂	Температура окисления +950 °С; давление водяного пара (5–10)×10 ⁵ Па; запыленность воздуха у рабочих мест не более 5 мг/м ³ .
Фотолитография	Толщина фоторезиста должна составлять не более трети минимального размера рисунка (1,1 мкм); адгезия считается удовлетворительной, если слой резиста 20×20 мкм отрывается за 20 мин; не допускается бой пластин.
Травление SiO ₂	Скорость травления от 0,075 до 0,095 мкм/мин; толщина SiO ₂ должна быть (0,65 ± 0,05) мкм; не допускается бой пластин.
Диффузия бора	Поверхностное сопротивление от 8 до 12 Ом/□
Разгонка базы	Поверхностное сопротивление (180 ± 10) Ом/□
Диффузия фосфора в эмиттер	Поверхностное сопротивление 3–3,6 Ом/□
Напыление металла	Магнетронное распыление мишени Al-Si; толщина пленки (1,4 ± 0,2) мкм; не допускается бой пластин.
Травление металла	Травитель на основе ортофосфорной кислоты; толщина металла должна быть (1,4 ± 0,2) мкм
Плазмохимическое осаждение (ПХО)	Давление кислорода под колпаком 3×10 ⁻³ мм рт. ст.; давление смеси аргона с моносиланом 3×10 ⁻² мм рт. ст.; толщина слоя ПХО (1,2 ± 0,1) мкм
Плазмохимическое травление	Травление плазмой СЗФ8; ускоряющее напряжение плазмы не более 200 В; мощность не более 1,2 кВт; расход активного газа 10 л/ч
Нанесение липкой ленты	Отсутствие остатков липкого слоя на поверхности пластин; не допускается бой пластин, трещин, сколов
Механическое утонение пластин	Не допускается бой пластин, трещин, сколов, зарезов; толщина пластины должна составлять (280 ± 20) мкм
Снятие липкой ленты	Допустимый разбор толщины после шлифовки до 10 мкм; не допускается бой пластин, трещин, сколов

Таблица 3. Виды брака на операции «Фотолитография»

Виды брака несоответствующей продукции	Количество брака, шт.	Процент брака, %
Бой проявления	8	27,59
Бой нанесения	7	24,14
Растрав	7	24,14
Бой исполнителя	3	10,34
Царапины	3	10,34
Прочее	1	3,45

экспонирования, проявления, задубливания, сроков хранения фоторезиста, различного рода загрязнениями и др.

При выставлении балла значимости дефекта S за основу взяты данные из таблицы 5.

Оценка значимости последствия отказа S проставлена от шести до восьми, то есть от менее значимого до более значимого последствия дефекта. Виды отказов, влияющие на безопасность (балл девять и девять), не выявлены. При экспертном выставлении балла возникновения O за основу была взята таблица 6.

Для некоторых технологических операций причиной дефекта может служить отклонение параметра от нормы. Так, для процессов «загонка бора (разделение)», «разгонка базы», «диффузия фосфора в эмиттер» основным видом дефекта может быть именование поверхностного сопротивления R_s. Для оценки вероятности возникновения отказов рекомендуется статистическая оценка параметров в соответствии с концепцией 3σ. Вначале формируют случайную выборку значений, определенную полем допуска, а затем определяют среднее арифметическое значение выборки, среднеквадратичное отклонение. Результаты статистического случайного анализа представлены в таблице 7.

Определим интервал поля допуска выборок как:

$$\delta = \bar{x} \pm 3\sigma$$

и, подставив среднее значение и СКО из таблицы 7, получим:

$$\delta_1 = (8,24; 11,23),$$

$$\delta_2 = (3,11; 3,56),$$

$$\delta_3 = (171,25; 185,46).$$

Далее вычисляем индекс воспроизводимости процесса C_p, который характеризует степень статистической управляемости процесса, то есть возможности параметра выйти за пределы допуска. Индекс C_p учитывает только разброс процесса и характеризует его соответствие ширине поля допуска:

$$C_p = (U-L)/6\sigma, \quad (2)$$

где U — верхнее предельное значение поля допуска показателя; L — нижнее предельное значение поля допуска показателя.

Подставив в равенство (2) значения δ₁, δ₂, δ₃, получим значения C_{p1} = 1,336, C_{p2} = 1,331,

Таблица 5. Оценка значимости последствий отказов [18]

Последствие	Критерий значимости последствия	Балл S
Опасное без предупреждения	Рабочий персонал подвергается опасности. Очень высокий ранг значимости, когда вид потенциального дефекта ухудшает безопасность работы и (или) вызывает несоответствие требованиям безопасности и экологии без предупреждения.	10
Опасное с предупреждением	Может подвергнуть опасности персонал. Весьма высокий ранг значимости, когда вид потенциального дефекта ухудшает безопасность работы и (или) вызывает несоответствие требованиям безопасности и экологии с предупреждением.	9
Очень важное	Большое нарушение производственного процесса. Может браковаться до 100% продукции. Высокая степень недовольства потребителя из-за невозможности дальнейшего использования.	8
Важное	Нарушение производственного процесса. Может потребоваться сортировка продукции, когда часть ее бракуется. Потребитель заметит небольшое ухудшение рабочих характеристик.	7
Умеренное	Нарушение производственного процесса. Часть продукции необходимо забраковать (без сортировки). Потребитель испытывает дискомфорт.	6
Слабое	Небольшое нарушение производственного процесса. Может потребоваться переделка до 50% продукции. Потребитель испытывает некоторое неудовлетворение.	5
Очень слабое	Небольшое нарушение производственного процесса. Может потребоваться сортировка и частичная переделка продукции. Этот дефект замечает большинство потребителей.	4
Незначительное	Небольшое нарушение производственного процесса. Может потребоваться переделка продукции на специальном участке. Дефект замечает средний потребитель.	3
Очень незначительное	Слабое нарушение производственного процесса. Может потребоваться доработка части продукции на основной технологической линии. Дефект замечает разборчивый потребитель.	2
Отсутствует	Нет последствий	1

Таблица 6. Оценка вероятности возникновения отказов

Балл O	Средний балл	Возможная интенсивность отказов	Вероятность отказов	
1	Не менее 1,67	Менее 1 из 150 000	Незначительная	Отказ маловероятен.
2	Не менее 1,5	1 из 150 000	Очень низкая	Отдельные отказы в идентичных процессах
3	Не менее 1,33	1 из 15 000	Низкая	Отдельные отказы в схожих процессах
4	Не менее 1,17	1 из 2000	Умеренная	Случайные отказы в схожих процессах
5	Не менее 1	1 из 400		
6	Не менее 0,83	1 из 80		
7	Не менее 0,67	1 из 20	Высокая	Часто появляющиеся отказы в схожих процессах
8	Не менее 0,51	1 из 8 (12,5%)		
9	Не менее 0,33	1 из 3 (33%)	Очень высокая	Отказа невозможно избежать
10	Менее 0,33	Более 1 из 2 (более 50%)		

Таблица 7. Статистическая оценка технологических операций

Операция	Установленное значение R_p , Ом/□	Количество измерений	Среднее значение	Среднеквадратичное отклонение (СКО)
Загонка бора	8–12	211	9,73	0,499
Диффузия фосфора	3–3,6	172	3,34	0,075
Разгонка базы	180 ±10	189	178,73	2,494

Таблица 8. Критерии обнаружения отказов

Балл O	Описание	Вероятность обнаружения	Эффективность, %
1	Контроль всегда обнаруживает дефекты (автоматическое включение сигнализации и остановка)	Очень высокая	Более 99
2	Контроль всегда обнаруживает дефекты (автоматическое включение сигнализации без остановки)		95
3	Контроль имеет высокие шансы обнаружения дефекта (все партии, 100%-ный контроль)	Высокая	90
4	Контроль имеет высокие шансы обнаружения дефекта (все партии, более 10% выборочный контроль)		80
5	Контроль имеет высокие шансы обнаружения дефекта (все партии, от 1 до 10% выборка)	Умеренная	70
6	Контроль может обнаружить дефект (все партии, менее 1% выборка)		60
7	Контроль имеет мало шансов обнаружения дефекта (выборочный контроль более 50% партий)	Низкая	50
8	Контроль имеет мало шансов обнаружения дефекта (выборочный контроль от 10 до 49% партий)		25
9	Контроль, возможно, не обнаруживает дефект (осмотр только на складе или проведение аудита)	Очень низкая	10
10	Контроль не обнаруживает или не может обнаружить дефект	Дефекты не выявляются	0

$C_{p3} = 1,3317$. В соответствии с таблицей 6 оценены значения C_p по трем операциям, выставлен балл $O = 3$ по данным видам дефектов на операциях. Для остальных видов дефектов выставлены оценки в соответствии с практическим опытом и анализом отказов аналогичных процессов. При выставлении балла обнаружения D взяты критерии из таблицы 8.

В основе выставления оценок обнаружения D лежит предыдущий опыт по возможностям обнаружения аналогичных причин дефектов при соответствующих методах проверки, заложенных в производственный процесс. Всем отказам присвоено значение три, так как существующие методики контроля после проведения технологических операций могут с высокой вероятностью обнаружить дефект. После выставления баллов проводится подсчет ПЧР по всем видам потенциальных несоответствий.

Выводы

Важнейшим этапом анализа характера и последствий отказа является проведение целенаправленных мероприятий по предупреждению дефектов. Подобные мероприятия представляют собой выполнение регламентных работ по подготовке оборудования (проверка настроенности процесса, работы оборудования, качества основных инструментов, своевременный ремонт и др.) и проверке действий оператора, а также дополнительный инструктаж операторов, ведение SPC-карты (контрольной карты) по процессу. FMEA-анализ и расчет показателей является основной частью проведения исследований. Оценки S , O , D , ПЧР и предупреждающие действия по устранению потенциальных отказов, их последствий и причин позволяют существенно повысить качество изделий.

Литература

1. Горленко О. А., Мирошников В. В., Борбац Н. М. Управление качеством в производственно-технических системах. Брянск: БГТУ, 2009.
2. Харрингтон Дж. Управление качеством в американских корпорациях. М: Экономика, 1990.
3. Баканов М. И. Теория экономического анализа. М.: Финансы и статистика, 1995.
4. Емельянов В. А. Системы качества в микроэлектронике. Минск: Белорусская наука, 1997.
5. Басовский Л. Е., Протасьев И. Б. Управление качеством. М.: ИНФРА-М, 2002.
6. Брагин В. В., Чабон Ф. Оценка риска и последствий отказов комплексной системы, конструкций, процессов. Ярославль, 1997.
7. Ануфриев Л. П. и др. Технология интегральной электроники / под ред. Достанко А. П., Гурского Л. И. Минск: Интегралполиграф, 2009.