

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

На правах рукописи

УДК 621.3.049.77-021.465

ТРЕТЬЯК
Владислав Дмитриевич

**УСКОРЕННАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МИКРОСХЕМ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание степени
магистра техники и технологий

по специальности 1-39 81 01 – Компьютерные технологии
проектирования электронных систем

Минск 2017

Работа выполнена на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель: **АЛЕКСЕЕВ Виктор Федорович**,
кандидат технических наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент: **БОНДАРИК Василий Михайлович**,
кандидат технических наук, доцент, заместитель декана факультета непрерывного и дистанционного обучения учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита диссертации состоится «22» июня 2017 г. года в 9⁰⁰ часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, Минск, ул. П.Бровки, 6, копр. 1, ауд. 415, тел. 293-20-80, e-mail: kafpiks@bsuir.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

ВВЕДЕНИЕ

Рост функциональной сложности интегральных схем (ИС), использование новых принципов конструирования и технологических процессов требуют постоянного совершенствования методов и технических средств контроля их качества. При этом возрастает число показателей, определяющих качество ИС.

Таковыми показателями являются значения электрических параметров, потребляемая мощность, процент выхода годных ИС, размеры элементов конструкции и другие. К числу важнейших из них относятся показатели надежности.

Темпы развития микроэлектроники существенно усложнили задачу прогнозирования и оценки качества ИС прежде всего потому что, надежность интегральных схем увеличилась, а «моральное старение» ускорилось. Получать достоверные оценки качества традиционными натурными методами испытаний нерентабельно: увеличение количества испытываемых образцов удорожает испытания, а увеличение продолжительности испытаний снижает достоверность результатов из-за разработки новых типов ИС и изменения технологии производства.

Трудности при оценке качества существенно возросли с появлением функционально сложных сверхбольших интегральных схем. При этом все площади, оборудование, аппаратура, энергетические и людские ресурсы должны быть задействованы в течение длительного времени. Это требует больших затрат.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Для получения достоверной информации о качестве ИС и предупреждения отказов, особое внимание должно быть уделено исследованиям физических причин отказов. В связи с этим возникает необходимость в разработке оперативных методов оценки качества ИС, позволяющих в короткий срок определить истинное значение показателей качества, уровень технологического процесса производства, и создании на их основе эффективной системы обеспечения требуемого уровня качества. То есть актуальна проблема получения оценок качества ИС, их устойчивости к внешним воздействующим факторам за короткое время не путем непосредственных натурных или даже ускоренных испытаний, а посредством проведения физико-технической экспертизы элементов ИС (химического состава среды в подкорпусном объеме, металлизации, активных элементов, слоев диэлектрика и т.д.) и ИС в целом.

Степень разработанности проблемы

Несмотря на коренное изменение принципов конструирования и технологии изготовления изделий, обусловленных развитием микроэлектроники, перспективность основных положений для оценки качества и надежности ИС, разработанных в последние десятилетия, сохраняется в трудах виднейших современных представителей отечественной школы надежности – Арутюнова П.А., Епифанова А.Д., Кузнецова В.А., Сретенского В.Н., Половно А.М. и др.. Однако полноту комплекса задач, связанных с обеспечением качества и надежности ИС, они не охватывают, так же как и не учитывают конструктивно-технологические особенности современных больших и сверхбольших ИС, составляющих основу комплектующих изделий перспективной радиоэлектронной аппаратуры.

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является разработка алгоритма обеспечения и ускоренной оценки качества ИС на основе требований к обеспечению качества на этапе разработки и производства, а также по результатам физико-технической экспертизы. Поставленная цель работы определяет следующие основные задачи:

1. Определить требования к процессам разработки, производства и технологическому процессу интегральных ИС.
2. Установить элементы конструкции и кристалла, параметры и критерии для контроля и оценки качества ИС, на основе полученных причинно-следственных связей между дефектами, отказами и технологическими операциями.
3. Разработать методику физико-технической экспертизы.

Область исследования

Содержание диссертации соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-38 81 01 «Компьютерные технологии проектирования электронных систем».

Теоретическая и методологическая основа исследования

В основу диссертации легли работы зарубежных ученых в области оценки качества и надежности различных классов электрорадиоизделий, а также анализ технических нормативных правовых актов по рассматриваемой тематике.

Информационная база исследования сформирована на основе литературы, открытой информации, технических нормативно-правовых актов, сведений из электронных ресурсов, а также материалов научных конференций и семинаров.

Научная новизна

Научная новизна и значимость полученных результатов работы заключается в разработке алгоритма оценки качества ИС по результатам физико-технической экспертизы.

Теоретическая значимость работы заключается в анализе математической модели оценки выхода годных микросистем на кремниевых пластинах.

Практическая значимость диссертации состоит в предложенном методе статистического контроля и регулирования технологических процессов, основанный на использовании толерантных пределов, позволяющий осуществлять статистический контроль при поставке ИС малыми партиями и прерывистом производстве.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Требования к процессам разработки, производства и технологическому процессу ИС, позволяющие обеспечить стабильность производства, а следовательно, высокое качество и надежность ИС.

2. Установление элементов конструкции и кристалла, параметров и критериев для контроля и оценки качества ИС, на основе полученных причинно-следственных связей между дефектами, отказами, технологическими операциями, позволяющие провести физико-техническую экспертизу.

3. Методика физико-технической экспертизы, позволяющая выбрать, уточнить и разработать методику оценки качества ИС.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на 53-ей научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, Беларусь, 2017 г.).

Публикации

Изложенные в диссертации основные положения и выводы опубликованы в 4 печатных работах. В их числе 2 статьи в сборниках материалов научных конференций и 2 тезиса докладов на научных конференциях.

Общий объем публикаций по теме диссертационной работы составляет 0,6 авторских листа.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

В первой главе рассмотрена проблема ускоренной оценки качества ИС. Приведены показатели качества ИС. Рассмотрены возможные методы ускоренной оценки качества. Сформулированы основные положения задачи ускоренной оценки качества на основе их физико-технической экспертизы. Дана общая постановка задачи исследований.

Приведены требования к процедурам проектирования, информационному обеспечению, тестовым структурам, контроля параметров пластин, оценочным, демонстрационным и рабочим ИС, библиотеке элементов и проектным нормам, требования к процессам производства ИС, технологическому процессу.

Во второй главе приведены результаты исследований по определению элементов конструкции и кристалла, параметров и критериев ускоренной оценки качества ИС на основе физико-технической экспертизы. Предложены аналитические выражения для оценки выхода годных микросистем на кремниевых пластинах.

В третьей главе приведены результаты исследований по определению номенклатуры конструктивно-технологических характеристик ИС, тестовых структур и методов их физико-технического анализа, разработке математических моделей расчета надежностных характеристик ИС на основе суперкристаллов. Дана характеристика разработанных методик физико-технической экспертизы. Проведена оценка качества физической структуры ИС.

В четвертой главе дана оценка возможности и особенности применения методов статистического контроля и регулирования технологических процессов.

В приложении представлены публикации автора и акт внедрения.

Общий объем диссертационной работы составляет 113 страниц. Из них 74 страницы основного текста, 18 иллюстраций на 8 страницах, 1 таблица на 1 странице, библиографический список из 72 наименований на 6 страницах, список собственных публикаций соискателя из 4 наименований на 1 странице, 3 приложений на 15 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрена проблема и трудности оценки качества ИС, а также описано обоснование актуальности темы.

В **общей характеристике работы** показана актуальность проводимых исследований, степень разработанности проблемы, сформулированы цель и задачи диссертации, обозначена область исследований, научная (теоретическая и практическая) значимость исследований, а также апробация работы.

В первой главе рассмотрены возможные методы обеспечения и ускоренных испытаний (испытания в форсированных режимах, моделирование деградационных процессов в ИС с помощью ЭВМ, оценка надежности ИС по базовым интенсивностям отказов элементов ИС и соответствующим коэффициентам, иммитационные методы оценки надежности).

Показано, что в связи со сложностью ИС наиболее достоверную оценку качества ИС можно получить методами физико-технической экспертизы. Суть ее заключается в выявлении (с целью устранения) недостатков проектирования и производства ИС, оценка их качества без проведения трудоемких и дорогостоящих натуральных испытаний. Объектом экспертизы являются элементы конструкции ИС: корпус, подкорпусной объем, кристалл и его структурно-топологическое исполнение, выводы и ИС в целом.

Предложена программа проведения физико-технической экспертизы по структурно-топологическим характеристикам, которой предусматривается:

1. Определение элементов конструкции и кристалла ИС, подлежащих экспертизе и проверяемых показателей для них.
2. Разработка порядка и последовательности экспертизы ИС.
3. Формирование перечня (при необходимости разработка) физико-технических методов, используемых при экспертизе по структурно-топологическим характеристикам.
4. Определение критериев оценки (значений показателей) при проверке элементов конструкции и кристалла ИС.
5. Отработка оценок качества элементов конструкции и кристалла ИС в целом.

Проведен анализ требований к процедурам проектирования. При проектировании должно проводиться моделирование работы ИС в условиях воздействия факторов, установленных в техническом задании для наихудшего сочетания факторов. Модели должны обеспечивать требуемую точность, быть апробированы и аттестованы. Процедуры проектирования должны предусматривать разработку необходимых тестовых структур для оперативной и достоверной оценки качества в процессе изготовления ИС.

Проведен анализ требований к информационному обеспечению. Разработчик должен иметь банки (базы) данных и знаний, позволяющих структурировать, накапливать и использовать информацию, необходимую для выполнения проектирования конструкции и технологии изготовления.

Обобщение данных маршрутных карт, а также данных по причинно-следственным связям позволило определить нормы и допуски на параметры технологического процесса.

Определены основные технологические операции (формирование диэлектрических слоев, литография и травление, формирование переходов, по-

лучение металлических слоев и др.), требования к ним, методы контроля технологических процессов.

Во второй главе рассмотрено влияние на надежность ИС конструкции, элементов ИС, подложки, качества термокомпрессионных соединений, фоторезиста, пассивации окисла, металлизации, корпуса и др.

Исследована взаимосвязь, видов дефектов и механизмов отказов микросхем с технологическими операциями: термокомпрессией, фотолитографией, диффузией имплантацией, окислением, металлизацией.

Исследовано влияние качества материалов на надежность ИС. Наибольшее влияние на надежность ИС оказывают полупроводниковые материалы, фотошаблоны, корпуса.

Приведены аналитические соотношения по предельному отклонению значений удельного сопротивления по торцу слитка и площади пластины. В качестве критериев эффективности проектирования, а также качества выполнения технологических операций, обработки исходных материалов предложены: однородность распределения удельного сопротивления по площади пластины; однородность распределения времени жизни неосновных носителей заряда в слитках и пластинах монокристаллического кремния; удельное сопротивление и толщины эпитаксиальных слоев в кремниевых однослойных эпитаксиальных структурах; время жизни неосновных носителей заряда в эпитаксиальных слоях. Для контроля качества материалов по предложенным критериям разработаны неразрушающие радиоволновые и оптические методы измерения удельного сопротивления и время жизни неосновных носителей заряда в слитках, пластинах и эпитаксиальных слоях кремниевых однослойных эпитаксиальных структурах. Методы характеризуются высокой локальностью, низкой погрешностью измерений.

На основании обобщения материалов влияния реализации конструктивно-технологических требований, взаимосвязи видов дефектов и механизмов отказов ИС с технологическими операциями, качества материалов на качество ИС, а также анализа отказов ИС, установлены причинно-следственные связи между видами, дефектами, характером их проявления, механизмами и причинами отказов ИС, которые целесообразно использовать при установлении параметров, критериев оценки качества ИС при их физико-технической экспертизе.

В третьей главе для определения норм оценки качества по конструктивно-технологическим характеристикам ИС и тестовых структур определены типы показателей качества:

– физические показатели - параметры, измеряемые с помощью методик физико-технической экспертизы;

– статистические показатели – результаты статистических расчетов, к ним относятся: воспроизводимость, стабильность, настроенность, выбросы за пределы среднего значения $\pm 3\sigma$, плотность отклонений на кристалл.

Определены показатели-критерии расчета статистических показателей качества ИС. Предложен метод распределенного скользящего резервирования при кластерной организации матрицы ПЭ и 30% - ной аппаратной избыточности для серийного производства суперкристаллов ОВС. Анализ вариантов реализации резервирования в матрице однородной вычислительной среды (ОВС) показал, что в перспективных суперкристаллах целесообразно использовать кластерную организацию матрицы ОВС с распределённой системой скользящего резервирования.

Получены соотношения для оценки вероятности выхода годных на этапе производства и вероятности безотказной работы на этапе эксплуатации суперкристаллов ОВС. Расчёты показывают, что введение резервных процессорных элементов в суперкристалл позволяет существенно увеличить его выход годных.

Разработан маршрут проведения физико-технической экспертизы, предусматривающий диагностику по внешним выводам, контроль качества корпуса и сборочных операций, контроль качества кристалла. Основными принципами формирования маршрута являются:

- включение в маршрут методов, наиболее информативных для данного типа ИС;
- приоритетность активных методов исследований над пассивными с целью выявления наибольшего количества скрытых дефектов;
- приоритетность неразрушающих методов, испытаний над разрушающими с целью минимизации числа ИС, требуемых для проведения физико-технической экспертизы.

Предложена методика комплексной физико-технической экспертизы ИС, заключающейся в системной оценке качества их проектирования и изготовления методами физико-технической экспертизы.

Разработаны и использованы ранее разработанные методики диагностики ИС по внешним параметрам, методики контроля качества корпуса и сборочных операций, методики контроля качества кристалла:

- оценка стойкости ИС к электрическим перегрузкам, анализ причин снижения электрической прочности ИС и возникновения отказов, связанных с пробоями и утечками.
- контроль газового состава подкорпусного объема ИС с использованием масс-спектрометра;
- методика контроля элементного состава тонких диэлектрических и металлических слоев ИС и качества золотого покрытия элементов корпуса;

- контроль теплового сопротивления ИС;
- методика оценки стойкости алюминиевой металлизации ИС к коррозии;
- методика контроля поверхностных и подповерхностных дефектов с помощью акустического микроскопа.
- методика оценки качества физической структуры ИС с помощью параметрического тестового контроля;
- методика контроля толщины полупроводниковых и диэлектрических слоев с помощью микроспектрофотометра-толщинометра;
- методика контроля пористости защитного диэлектрика на ИС;
- методика контроля распределения потенциалов;
- методика контроля термостабильности подзатворного диэлектрика в МДП структурах;
- методика контроля линейных размеров топологических элементов;
- методика измерения времени жизни неравновесных носителей заряда в кристаллах подложках высокоомного монокристаллического кремния.

В четвертой главе проведен анализ методов статистического контроля. Даны рекомендации о возможности применения статистического контроля и регулирования технологического процесса с учетом особенностей производства.

Критерии качества технологического процесса (ТП) на основе наиболее вероятных оценок коэффициента, характеризующего потенциальную воспроизводимость ТП и коэффициента, характеризующего реальную воспроизводимость ТП более пригодны для оперативной оценки и управления качеством ТП, однако они недостаточно наглядны и понятны что затрудняет их применение технологами и разработчиками ТП. Поэтому предлагается в дополнение к указанным показателям показана возможность использовать для оценки качества ИС коэффициент смещения для достижения технического или экономического результатов:

$$C_{см} = \frac{(X_{cp} - X_n)}{\Delta}, \quad (1)$$

где X_{cp} – среднеарифметическое значение параметра,

X_n – номинальное значение параметра,

$$\Delta = \frac{(T_в - T_n)}{2} \text{ (см. рисунок 1)}$$

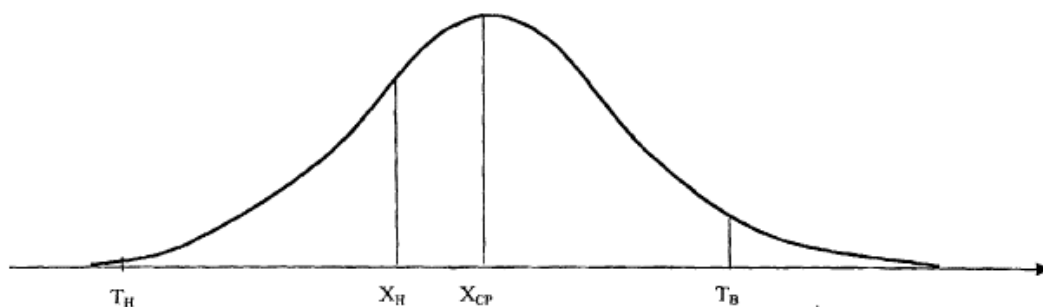


Рисунок 1 – Диаграмма распределения технологических потерь по операциям изготовления ИС (пример для серии 564)

Предложен метод статистического контроля качества ИС для партий малого объема при прерывистом производстве. Так как при возникновении прерывов в производстве предприятию изготовителю ИС необходимо провести всестороннюю проверку и переналадку технологического процесса для обеспечения нормального функционирования производства, осуществление статистического контроля при помощи стандартных статистических методов является невозможным из-за недостаточного объема статистических данных, поэтому был разработан алгоритм, который позволяет использовать статистический контроль ТП изготовления ИС для партий малого объема в условиях прерывистого производства. Алгоритм включает:

- метод оценки статистических характеристик по результатам контроля партий ИС с различными объемами контролируемых значений параметра;
- метод оценки допустимых пределов (толерантных границ) для контролируемого параметра по результатам испытаний ИС с малыми объемами выборки.

Показана возможность использования методов физико-технической экспертизы для ускоренной оценки влагоустойчивости ИС. Для достижения технического результата нужно провести анализ газовой среды в подкорпусном объеме ИС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Определены требования к процессам разработки и производства и прежде всего технологическому процессу.
2. Установлены элементы конструкции и кристалла, параметры и критерии для контроля и оценки качества ИС, на основе полученных причинно-следственных связей между дефектами, отказами, технологическими операциями.

3. Разработана методика физико-технической экспертизы.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно–компьютерных систем учреждения образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники в учебный курс “Теоретические основы проектирования и надежности радиоэлектронных средств”.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в сборниках научных трудов

1. Конструктивно-технологическое обеспечение качества и надежности ИС/ В.Д. Третьяк, В.Ф. Алексеев // Новые информационные технологии в научных исследованиях: сб. науч. трудов по материалам всероссийской науч.–техн. конф., Рязань, Российская Федерация / РГРТУ. – Рязань. 2016. – 347–349.

2. Подходы к построению программы испытаний на надежность интегральных схем/ В.Д. Третьяк, В.Ф. Алексеев // Новые информационные технологии в научных исследованиях: сб. науч. трудов по материалам всероссийской науч.–техн. конф., Рязань, Российская Федерация / РГРТУ. – Рязань. 2016. – 347–349.

Тезисы конференций

3. Третьяк, В.Д. Системы управления качеством ИС на этапе разработки и изготовления / В.Д. Третьяк, В.Ф. Алексеев // материалы 53–ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Проектирование информационно–компьютерных систем», Минск, Респ. Беларусь, 02–06 мая 2017 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2017. – принята в печать.

4. Третьяк, В.Д. Технологические тренировки интегральных схем / В.Д. Третьяк, В.Ф. Алексеев // материалы 53–ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Проектирование информационно–компьютерных систем», Минск, Респ. Беларусь, 02–06 мая 2017 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2017. – принята в печать.

РЭЗІЮМЭ

Трацяк Уладзіслаў Дзмітрыевіч

Паскораная ацэнка якасці мікрасхем па выніках фізіка-тэхнічнай экспертызы

Ключавыя словы: якасць ІС, мадэль.

Мэта працы: распрацоўка метадаў забеспячэння якасці і надзейнасці Мікросхем на аснове вызначэння патрабаванняў да працэсаў праектавання і вытворчасць; статыстычнага кантролю тэхналагічных працэсаў, паскоранай ацэнкі працаздольнасці ІС па выніках фізіка-тэхнічнай экспертызы элементаў канструкцыі і крышталю, матэматычных мадэляў ацэнкі выхаду здольных мікросистем на крамянёвых пласцінах.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: вызначаны патрабаванні да працэсаў распрацоўкі і вытворчасці і перш за ўсё тэхналагічнаму працэсу. Усталяваныя элементы канструкцыі і крышталю, параметры і крытэрыі для кантролю і ацэнкі якасці ІС, на аснове атрыманых прычынна-следчых сувязяў паміж дэфектамі, адмовамі, тэхналагічнымі аперацыямі. Распрацаваны маршруты (парадак правядзення) фізіка-тэхнічнай экспертызы; неабходнасць выбару, удакладнення і распрацоўкі метады ацэнкі якасці ІС на аснове выкарыстання фізіка-тэхнічнага метаду; праведзены аналіз матэрыялаў мадэляў ацэнкі выхаду здольных мікросистем на крамянёвых пласцінах.

Ступень выкарыстання: вынікі ўкаранены ў навучальны працэс на кафедры праектавання інфармацыйна-камп'ютэрных сістэм ўстанова адукацыі "Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі ў навучальны курс "Тэарэтычныя асновы праектавання і надзейнасці радыёэлектронных сродкаў".

Вобласць ужывання: мікрапрацэсарныя сістэмы.

РЕЗЮМЕ

Третьяк Владислав Дмитриевич

Ускоренная оценка качества ИС по результатам физико-технической экспертизы

Ключевые слова: качество ИС, модель.

Цель работы: разработка методов обеспечения качества и надежности ИС на основе определения требований к процессам проектирования и производства; статистического контроля технологических процессов, ускоренной оценки работоспособности ИС по результатам физико-технической экспертизы элементов конструкции и кристалла, математических моделей оценки выхода годных микросистем на кремниевых пластинах.

Полученные результаты и их новизна: определены требования к процессам разработки и производства и прежде всего технологическому процессу. Установлены элементы конструкции и кристалла, параметры и критерии для контроля и оценки качества ИС, на основе полученных причинно-следственных связей между дефектами, отказами, технологическими операциями. Разработаны маршруты (порядок проведения) физико-технической экспертизы; необходимость выбора, уточнения и разработки методики оценки качества ИС на основе использования физико-технического метода; проведен анализ математических моделей оценки выхода годных микросистем на кремниевых пластинах.

Степень использования: результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники в учебный курс “Теоретические основы проектирования и надежности радиоэлектронных средств”.

Область применения: микропроцессорные системы.

SUMMARY

Vladislav D. Tretyak

Accelerated evaluation of the quality of microcircuits based on the results of physical and technical expertise

Keywords: ELIC quality, model.

The object of study: development of methods for ensuring the quality and reliability of microcircuits based on the definition of requirements for design and production processes; Statistical control of technological processes, accelerated evaluation of the operability of integrated circuits based on the results of physical and technical expertise of structural and crystal elements, mathematical models for estimating the yield of suitable microsystems on silicon wafers.

The results and novelty: the requirements to the processes of development and production, and, first of all, to the technological process. Elements of the construction and crystal, parameters and criteria for monitoring and evaluating the quality of IC are established on the basis of the resulting cause-effect relationships between defects, failures, and technological operations. The routes (procedure) for physical and technical expertise have been developed; need to select, refine and develop a methodology for assessing the quality of IC based on the use of a physical and technical method; an analysis of mathematical models for estimating the yield of suitable microsystems on silicon wafers is carried out.

Degree of use: the results implemented in the educational process at the department of design information and computer systems educational institution "Belarusian State University of Informatics and Radio Electronics in the training course "Theoretical Foundations of Design and Reliability of Radioelectronic Facilities".

Sphere of application: MPU-sor system.