

УДК 658.5

**Автоматизация операций прослеживаемости качества
интегральных структур при производстве сверхбольших
интегральных схем**

Смирнов К.К.

Научно-исследовательский институт системных исследований РАН,

Нахимовский проспект, 36, корп.1, Москва, 117218, Россия

e-mail: mail@konstantinsmirnov.com

Аннотация

В статье рассматривается задача обеспечения прослеживаемости качества интегральных структур при проведении функционального контроля сверхбольших интегральных схем (СБИС) в условиях производства. Для решения данной задачи разработан оригинальный специализированный программный комплекс, обеспечивающий указанную прослеживаемость и осуществляющий обработку, анализ и представление результатов. Описана структура и функциональные возможности комплекса, приведены примеры выполнения анализа результатов измерений, полученных в условиях производства интегральных структур.

Ключевые слова: микросхемы, прослеживаемость, испытание микросхем, программное обеспечение, функциональный контроль.

Введение

В настоящее время качество современных интегральных микросхем рассматривается как комплексный показатель, который напрямую зависит от метрологического обеспечения производства и совершенства технологического процесса. Для решения проблем, связанных с обеспечением качества выпускаемых изделий, не достаточно проведения разрозненных локальных мероприятий с контролем отдельно взятых показателей качества, а важно оценивать их в комплексе на всех этапах проектирования и производства.

Современное развитие микроэлектроники с широкой миниатюризации решений усложняет технологии контроля, измерения, испытания СБИС [9] и требует постоянного совершенствования технологического маршрута их изготовления, разработку новых конструкторско-технологических решений при конструировании производственной оснастки, создание новых инструментов контроля и оценки параметров, ужесточение цеховых норм и переход к более высокому уровню автоматизации производственных процессов [1,10].

Автоматизированные системы для проведения функционального, диагностического и параметрического контроля СБИС позволяют сохранять результаты измерений контролируемых параметров с целью дальнейшего анализа. Анализ результатов измерений выполняется с целью выявления критических параметров, механизмов и причин возникновения отказов СБИС и корректировки границ допусков контролируемых параметров.

Система мониторинга производственного процесса является одним из важных элементов системы менеджмента качества. С целью обеспечения соответствия производимой продукции установленным требованиям в процесс производства на различных стадиях внедряется ряд измерительных и контрольных операций [8]. Измеряемые показатели на каждой операции должны соответствовать нормативным значениям. В связи с этим на производстве необходима система автоматизированного контроля, сохранения истории, доступа и поиска измеряемых параметров.

Одной из проблем, с которыми сталкивается производство сверхбольших интегральных схем, является разнообразие измерительного оборудования, форматов данных и платформ, с помощью которых решается задача измерения параметров готовой продукции. Обеспечение удобного доступа к результатам измерения вне зависимости от используемого оборудования и платформы позволяет значительно упростить работу и увеличить эффективность сотрудников, ответственных и вовлеченных в производственный процесс.

Современные, серийно выпускаемые СБИС имеют большой набор контролируемых параметров с достаточно большим разбросом [2]. В результате чего при проведении отбраковочных испытаний этих СБИС на контрольных операциях функционального и диагностического контроля часть выборки может не удовлетворять нормам, установленным в ТУ, что приводит к увеличению затрат при изготовлении СБИС. В связи с этим необходимо на ранних этапах производства выявлять потенциально нестойкие СБИС и исключать их из выборки.

Основными контрольными операциями, характеризующие качество выпускаемой продукции являются параметрический и функциональный контроль полупроводниковых пластин и микросхем.

Функциональный контроль СБИС проводится на оборудовании анализа полупроводниковых структур AdvanTest V93000 (Agilent 93000), в состав которого включены средства для формирования файлов отчетов с результатами измерений в формате Generic Data Format (GDF). Использование данного формата является удачным выбором в случае коротких программ тестирования с небольшим количеством контролируемых параметров. Производство высоко сложных изделий, в том числе СБИС, сегодня предъявляет повышенные требования к качеству тестирования [3]. В связи с этим растет размер файлов тестовых векторов (англ. «test pattern») программ тестирования и объем выходных данных, предоставляемых технологическому и обслуживающему персоналу, а также разработчикам микросхем для анализа качества изделий, как в автоматизированном режиме, так и в произвольных формах для решения исследовательских задач. Входящие в состав программного обеспечения оборудования AdvanTest V93000 средства для формирования отчетов в форматах GDF или STDF при определенной сложности программ достигают ограничения в размере обрабатываемых данных. Такое ограничение было встречено при тестировании полупроводниковых пластин ряда изделий. Помимо этого форматы GDF и STDF не поддерживаются другим испытательным и производственным оборудованием. Для решения задачи хранения результатов измерения, а также для обмена данными между оборудованием рассматривался расширяемый язык

разметки, но он обладает большой избыточностью, в следствии чего файлы с результатами могут занимать более 2Гб дискового и на их обработку будет уходить много времени.

Перечисленные форматы не являются строго типизированными и не позволяют сохранять данные, требующиеся разработчикам микросхем и технологам производить глубокий анализ результатов. К таким данным можно отнести графические изображения (например, след от контактирования зондовых игл), карты ошибок, результаты измерений по отдельным выводам, графики (вольтамперные характеристики, температурный профиль, изменение значения параметра во времени).

Также к существенному недостатку форматов XML и GDF можно отнести контейнерный принцип хранения данных, что увеличивает время обработки файла и не позволяет получить данные из файлов, запись в которые была прервана вследствие аварийной ситуации на оборудовании.

Одним из эффективных методов хранения данных является сервер с системой баз данных. Но ввиду того, что объемы хранимой информации достаточно велики и для каждого изделия набор сохраняемой информации отличается, принято решение в базе данных хранить информацию о прослеживаемой партии изделий и ссылки на файлы с результатами измерения параметров.

Предлагаемый метод. Для решения задачи хранения результатов измерения и при сбое устойчивого информационного обмена между оборудованием был разработан универсальный формат хранения результатов

функционального контроля Report Standard Type Language (RSTL). При разработке данного формата к нему были предъявлены дополнительные требования по типизации хранимых данных и более строгие требования к надежности. Формат RSTL представляет собой текстовый командный файл со следующим синтаксисом:

```
<command> arg1[ arg2 argN] [{key1=value1[key2=value2;keyK=valueK]}],
```

где

arg1.argN– позиционные аргументы,

key1.keyK – имена именованных аргументов, value – значение именованных аргументов.

Таким образом, каждая команда может быть вызвана с N позиционными аргументами и K парами ключей и значений. Такой подход позволяет в первую очередь упростить генерацию и разбор результатов за счет упрощения соответствующих библиотек.

Предложенный формат внедрен для хранения результатов на контрольных операциях и для межоперационного обмена (например, передача карты годности пластины на операцию разделение пластины на кристаллы, на которой с пластины вынимаются годные кристаллы).

Обеспечение единообразного доступа к результатам измерения принимающим участие в анализе данных сотрудникам различных подразделений предприятия является одной из актуальных задач в условиях современного

производства. Для решения такой задачи требуется автоматизировать процесс измерения на контрольных операциях и обеспечить возможность быстрой обработки данных с нескольких операций или между партиями.

Среди программных решений, позволяющих автоматизировать процесс измерений, можно отметить LabView и Agilent VEE. Данные системы предназначены для решения инженерных задач выполнения измерений, и, как правило, включение в разрабатываемое в них приложение дополнительной функциональности сохранения данных в универсальный формат и одновременного формирования отчета, значительно усложняют приложение.

С целью решения данной задачи разработана клиент-серверная система «Sigma Viewer», позволяющая решать следующие задачи:

- сбор результатов измерений с различного измерительного оборудования с учетом сопроводительной информации;
- отображение результатов измерений в единообразном интерфейсе;
- анализ результатов измерений при помощи встроенной среды анализа данных “Lorenz”;
- подготовка отчетов о проведенных измерениях по шаблонам.

Инфраструктура Sigma Viewer позволяет накапливать полную статистику по всем измеренным параметрам микросхем и полупроводниковых пластин и проводить их анализ с целью выявления критических параметров, механизмов и причин возникновения отказов СБИС[4] и установки границ допусков контролируемых параметров (введение цеховых норм). Так, например, при

обнаружении отказов микросхем СБИС на повышенной температуре по статическому току потребления (I_{сс}) процессный технолог с помощью соответствующих инструментов анализа может выявить наличие корреляции между результатами на разных этапах производства микросхемы, после чего оценить и скорректировать нормы и параметры на более раннем этапе.

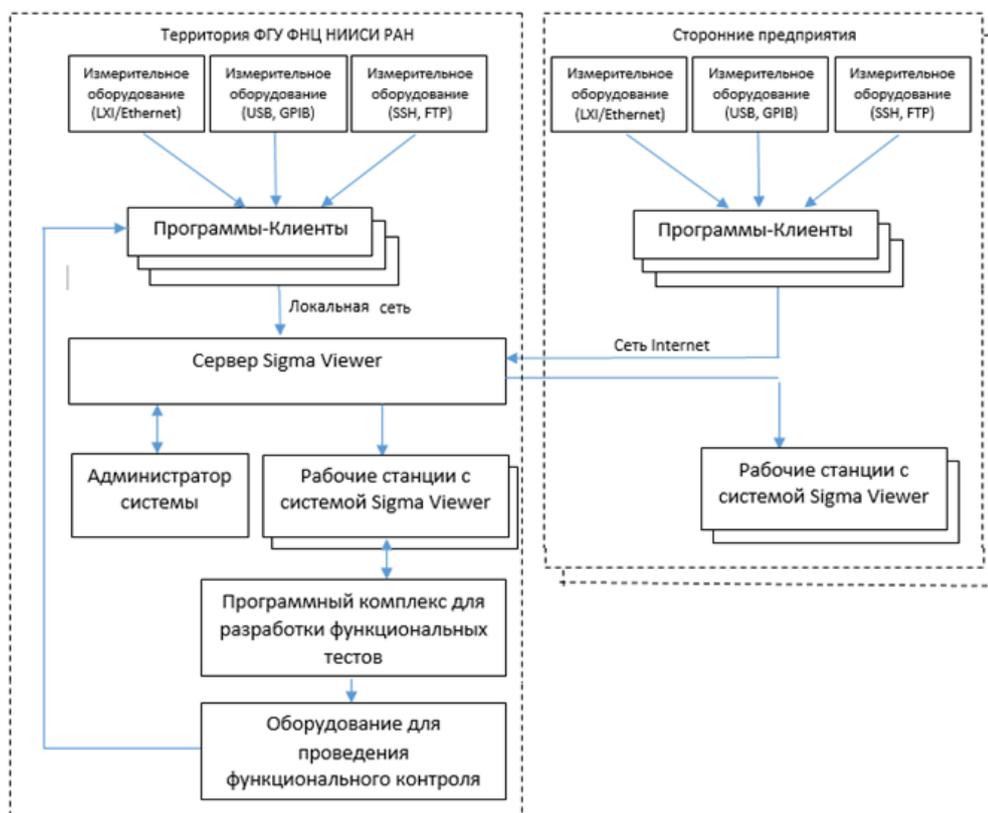


Рисунок 1 – Функциональная схема системы «Sigma Viewer»

На рисунке 1 приведена функциональная схема информационной инфраструктуры системы Sigma Viewer. В системе используется единый интерфейс взаимодействия с программами-клиентами, что позволяет использовать различные методы и протоколы взаимодействия с измерительным и испытательным оборудованием. Также в системе предусмотрены

административные функции, позволяющие вводить разграничение прав на выполнение различных функций.

Система состоит из серверной и клиентской частей. Серверная часть, представляющая собой базу данных под управлением СУБД и управляющего ПО, решает следующие задачи:

- сбор результатов измерений с различного измерительного оборудования при помощи имеющихся на оборудовании инструментов, либо специализированного клиентского программного обеспечения;
- индексация собранных данных;
- предоставление клиентской части API для доступа к базе данных;
- хранение в БД дополнительной информации об объектах предметной области (тип предмета труда, конфигураций измерительной оснастки, схемы коммутации оснастки).

Клиентская часть состоит из программ-клиентов управления оборудованием и сбора данных, а также программ для анализа результатов и системы разработки функциональных тестов [5].

Такая организация системы позволяет выполнять сложный анализ результатов на контрольных операциях технологического маршрута и разрабатывать программы контроля с вариативным выполнением. Например, проводить разбраковку кристаллов на пластине в зависимости от значений, полученных на предыдущих технологических операциях (рисунок 2).



Рисунок 2 – Пример вариативного выполнения программы функционального контроля по результатам, полученным с предыдущей операции.

В процессе функционирования клиентская часть оперирует понятиями предметной области производства микроэлектронной продукции, такими как: пластина (Wafer), кристалл (Die), микросхема (Chip), трей (Tray) и корпус (Package). По мере прохождения изделий по маршруту в системе сохраняются связи между предметами труда. Так по уникальному серийному номеру микросхемы можно проследить весь маршрут ее изготовления и получить информацию обо всех контролируемых параметрах в процессе изготовления.

Измеряемые параметры предметов труда имеют сложную структуру. Например, результаты функционального контроля и измерения электрических параметров кристаллов пластины формируют карту годности (КГ) пластины. В свою очередь, к измеряемым параметрам кристаллов относятся непосредственно результаты функциональных тестов и электрических измерений, а так же расширенная информация, такая как результаты измерений по выводам, графики изменения параметров в процессе измерения/испытания.

Благодаря интеграции клиентских систем анализа данных и системы разработки функциональных тестов, разработчики микросхем получили возможность существенно сократить время выполнения исследовательских функциональных тестов и, как следствие, сократить время анализа отказов изделий. Такие тесты описываются разработчиком не в виде тестовой таблицы а в виде параметризованого алгоритма на языке Steel[6], совмещающем в себе возможности прикладного языка программирования и языка описания аппаратуры. При помощи операторов для описания функциональных схем и конечных автоматов описывается функциональный тест, а средства прикладного языка позволяют частично автоматизировать этот процесс и задать условия подключения функциональных узлов теста (рисунок 3).

Такой тест динамически строится во время своего выполнения и по сути может быть уникальным для каждого экземпляра кристалла или микросхемы. Возможности языка, описывающего алгоритм тестирования позволяют динамически сгенерировать тестовую таблицу во время запуска теста по условиям, зависящим от результатов, полученных на предыдущих технологических операциях. Это позволяет в случае проведения исследовательских работ по отказам изделий не запускать полный функциональный тест, а создавать минимально-необходимый тест, уникальный для каждого экземпляра тестируемого изделия, что позволит существенно сократить время анализа отказов.

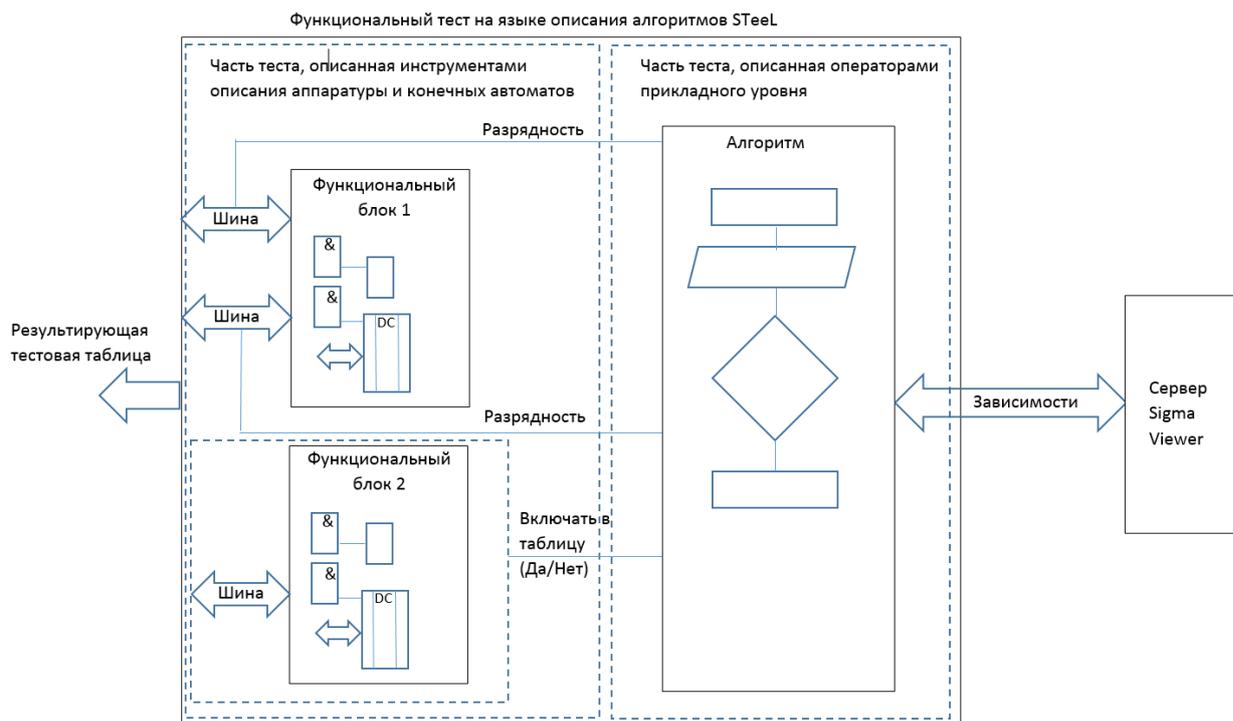


Рисунок 3 – Пример вариативной тестовой таблицы, описанной на языке
STeeL

В виду того, что современные логические анализаторы не поддерживают динамические тестовые таблицы был разработан прототип логического анализатора с поддержкой динамических тестовых таблиц, разработанных на языке STeeL.

В качестве примера алгоритма построения исследовательского динамического теста можно привести функциональный тест кристалла статического ОЗУ. Разделим на группы основные неисправности микросхем памяти:

1. Неисправность дешифратора адреса
2. Ошибки в одиночных ячейках
3. Перекрестные ошибки в нескольких ячейках

При этом неисправность может проявляться как в статическом, так и динамическом режимах работы и зависеть от температуры окружающей среды.

В настоящее время существует несколько алгоритмов тестирования памяти, которые позволяют выявить причины отказа схемы. Примерное время выполнения наиболее простых алгоритмов находится в пределе:

$$2 \cdot N \cdot t_{ad} \cdot k \quad \dots \quad N^2 \cdot t_{ad} \cdot k$$

где N - количество ячеек памяти, t_{ad} – средняя длительность обращения,

k - количество обращений к ячейке.

Количество ячеек современных микросхем СОЗУ достаточно высок и достигает величины $N = 16 \cdot 10^6$, количество обращений к ячейкам памяти в маршевых тестах может достигать до 100 обращений. Учитывая, что исследованию подвергается вся пластина, а для выявления причины возникновения дефектов необходимо использовать несколько алгоритмов тестирования, последовательно запуская тесты при различных температурах окружающей среды и граничных напряжениях питания схемы, общее время тестирования одной пластины будет достаточно велико и может достигать нескольких суток. Для сокращения времени тестирования предлагается анализировать кристаллы только с малым числом ошибок и более подробный анализ функционирования вести по выделенным подобластям, которые определяются в границах отказавших ячеек памяти (рисунок 4).

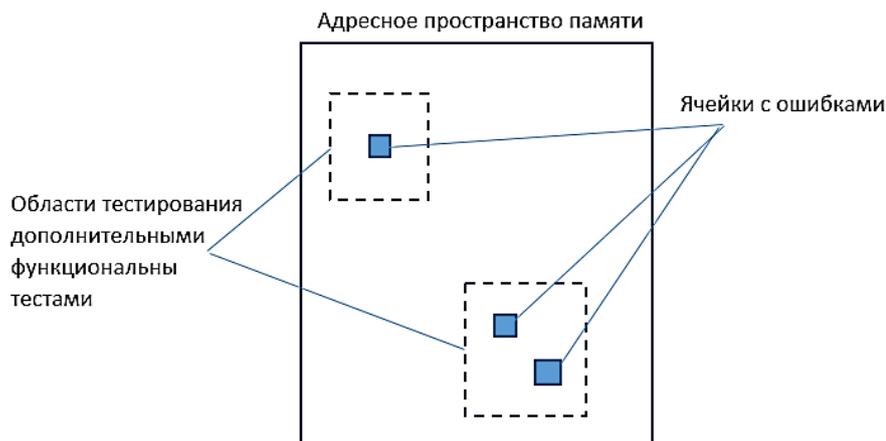


Рисунок 4 – Ограничение области тестирования памяти.

Ввиду того, что тестирование пластины при различных температурах проводится на различных технологических операциях, необходимо вначале произвести полный функциональный контроль с сохранением карт ошибок при комнатной температуре. После этого отбираются кристаллы с малым числом ошибок и определяется тип неисправности. Для кристаллов с неисправным дешифратором адреса запускаются исследовательские тесты дешифратора, а для каждого кристалла со сбойными ячейками автоматически определяются граничные области адресного пространства и динамически формируются тестовые таблицы по которым проводится функциональный контроль.

Для более детального анализа отказавших ячеек предлагается использовать алгоритм Iddt (Transient supply current) [7], основанный на анализе скачка тока потребления кристалла в момент переключения из одного состояния в другое.

При проведении функционального контроля пластины при повышенной рабочей температуре программа запрашивает результаты тестирования при комнатной температуре и проводит анализ только сбойных кристаллов по

определенным областям ячеек для каждого кристалла. Полученные результаты автоматически сравниваются с результатами предыдущей операции и подсчитывается количество ячеек в области, сохранивших ошибку, ячеек с исчезнувшей ошибкой и ячеек с приобретённой ошибкой и оформляются в виде графических карт годности.

Клиентское приложение для анализа данных обладает широким набором инструментов. Например, анализ распределения некоторого параметра по пластине можно произвести непосредственно в программе, воспользовавшись соответствующим инструментом, выполненным в виде ряда диалоговых окон и форм. Другой возможностью анализа является применение встроенного языка Python для написания произвольных скриптов анализа данных. Данный язык используется в качестве внутреннего скриптового языка, при этом программа предоставляет в распоряжение пользователя дополнительные классы и методы для вывода данных, например, в виде таблицы, графика, гистограммы или карты годности пластины. По умолчанию, большинство данных может быть экспортировано в виде таблиц Excel, либо изображений формата PNG.

Программа позволяет провести анализ результатов функционального контроля пластин путем обработки значительного объема данных при помощи нескольких нелинейных алгоритмов, а также представить результаты в наглядном виде.

Рабочий лист программы анализа представляет собой окно, в котором код чередуется с результатом выполнения, что позволяет итеративно вносить правки в программный код и, в итоге, получить на рабочем листе последовательно

необходимый алгоритм с промежуточными результатами. Рабочий лист может быть сохранен в файл для повторного использования. Фрагменты кода могут быть вынесены в файлы-библиотеки для повторного использования из главного окна программы.

Возможность обращаться одновременно к результатам измерений различных операций позволяет проводить межоперационный анализ данных. Например, возможно провести корреляционный анализ результатов электрических измерений и функционального контроля полупроводниковой пластины совместно с ее результатами электрофизических измерений на разных этапах кристального производства. При помощи программы Sigma Viewer также возможна подготовка отчетов, включающих только выбранные пользователем категории результатов измерений. Отчеты затем экспортируются в формат Excel.

Разработанная программа позволяет просматривать информацию об ошибках (номера сбойных циклов и названия сигналов) и отображать их в графическом виде. Пример реализации алгоритма работы с информацией об ошибках, возникших при тестировании кристаллов, приведен на рисунке 5.

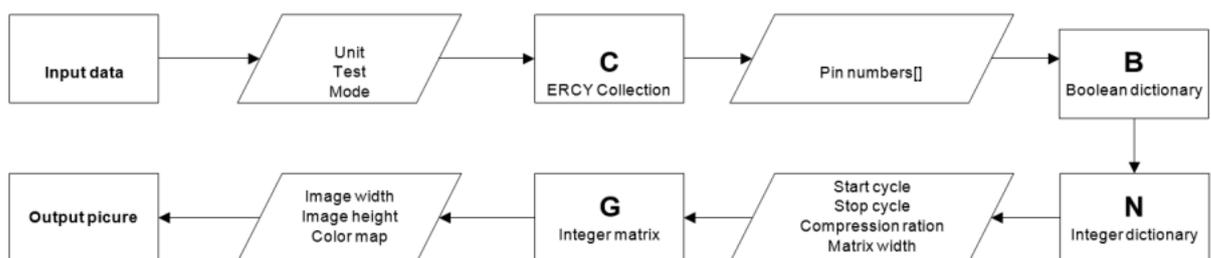


Рисунок 5 - Алгоритм работы с информацией об ошибках

Анализ ошибок и представление результата в наглядной форме в виде графического изображения состоит из 10 шагов:

- получение входных данных из отчета в виде массива информации об ошибках для всей пластины;
- выборка по заданным координатам в пространстве данных: кристалл, тест, режим тестирования;
- получение коллекции-словаря ошибок на основе выборки;
- учет влияния выводов шины данных;
- получение булевской коллекции-словаря на основе выборки, учитывающей выводы;
- произвольные манипуляции с коллекциями-словарями (объединение, пересечение, сложение) для реализации заданного алгоритма;
- выборка фрагмента данных для отображения на основе номера начального сбойного цикла, конечного сбойного цикла, коэффициента сжатия и ширины матрицы;
- получение матрицы данных по выборке;
- формирование изображения;
- экспорт сформированного изображения;
- построение карт ошибок.

В качестве дополнительного инструмента анализа данных в программу включена возможность построение топологической модели кристалла сверхоперативного запоминающего устройства (СОЗУ) на основе анализа карт ошибок функциональных тестов. Тестирование кристалла выполняется на оборудовании AdvanTest V93000 или специализированном блоке функционального контроля микросхем СОЗУ (БФК СОЗУ). Функциональный тест при этом строится по специальному алгоритму. В случае, если изделие содержит какие-либо дефекты, выявляемые данным алгоритмом, в процессе тестирования некоторые циклы теста дадут сбой. Номера этих циклов затем могут быть преобразованы в координаты сбойных ячеек на топологической модели. В настоящее время поддерживаются известные алгоритмы тестирования памяти Chess, Galrow и March. На рисунке 6 показано окно программы с топологической картой кристалла, поостренной по результатам теста памяти Chess.

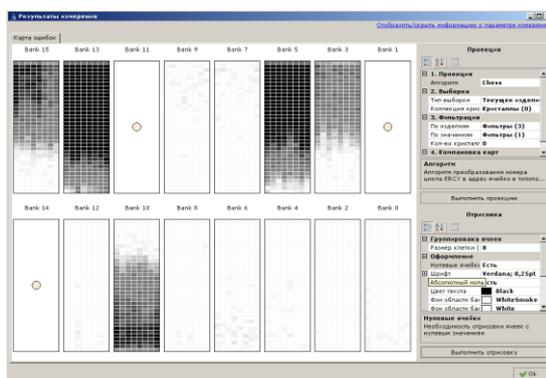


Рисунок 6 - Окно программы с топологической моделью кристалла, построенной по результатам теста памяти Chess

Программой поддерживается возможность интегрального анализа кристаллов всей пластины для выделения повторяющихся сбоев. Для этого добавлена возможность учитывать при анализе либо все кристаллы полупроводниковой

пластины, либо только кристаллы, удовлетворяющие заданным условиям (например, по годности, результату определенного теста или по наличию в списке, сформированным пользователем вручную), указания граничного значения числа ошибок в некоторой ячейке для отсеивания редких сбоев и концентрации внимания на наиболее частых случаях. Визуальное отображение топологической карты может быть различным, в частности имеется возможность выбора цветовой схемы (правила преобразования из числа ошибок в цвет ячейки на карте), в качестве дополнения реализована возможность изменения цвета фона, шрифта, размера клетки и прочее.

Технологический процесс производства кристаллов СБИС по сути является групповым, при котором все кристаллы, расположенные на полупроводниковой пластине одновременно подвергаются одинаковому воздействию, но в силу влияния различных дестабилизирующих факторов, величины параметров кристаллов в рамках одной пластины могут отличаться друг от друга. Для оценки распределения некоторого параметра на пластине в Sigma Viewer встроен инструмент для построения карты распределения параметра по пластине (рисунок 7). Этот инструмент позволяет визуально наблюдать тенденции изменения измеренного параметра в привязке к геометрии пластины, исключать из рассмотрения замаскированные по критерию Граббса кристаллы, установить фильтрацию по годности или по уровню значения. Инструмент так же определяет наличие бимодальности в распределении.

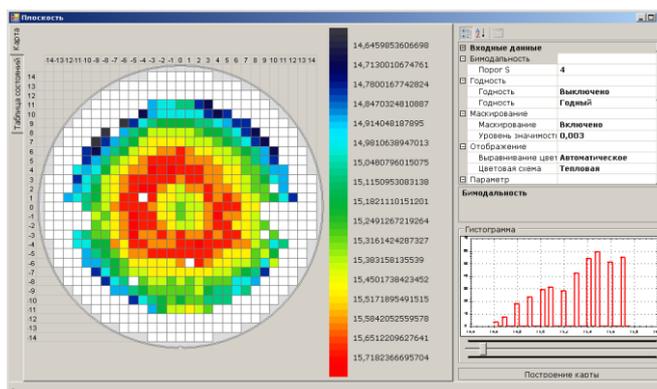


Рисунок 7- Распределение некоторого параметра по пластине

В качестве примера использования данного инструмента можно привести пример построения карты распределения количества работающих банков кристаллов СОЗУ при различном напряжении питания. На рисунке 8 представлены карты распределения количества работающих банков на пластине из которых видно, что кристаллы с наибольшим числом работающих банков расположены в центральной и верхней области (им соответствует более темный цвет на картах). Числовое значение указывает число работающих банков памяти.

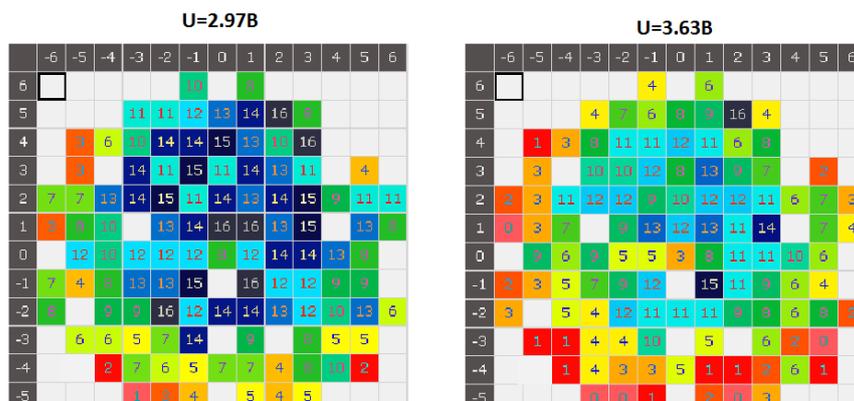


Рисунок 8 - Карты распределения количества работающих банков на пластине

Еще одним инструментом для анализа полупроводниковых пластин является инструмент группировки кристаллов по одинаковым спискам сбойных выводов. Этот инструмент позволяет выявить повторяемые дефекты. Два кристалла входят в одну группу тогда и только тогда, когда на заданном тесте произошли сбои на одних и тех же выводах. Далее группам присваиваются порядковые номера и контрастные цвета, и производится их отображение на карте пластины (рисунок 9).

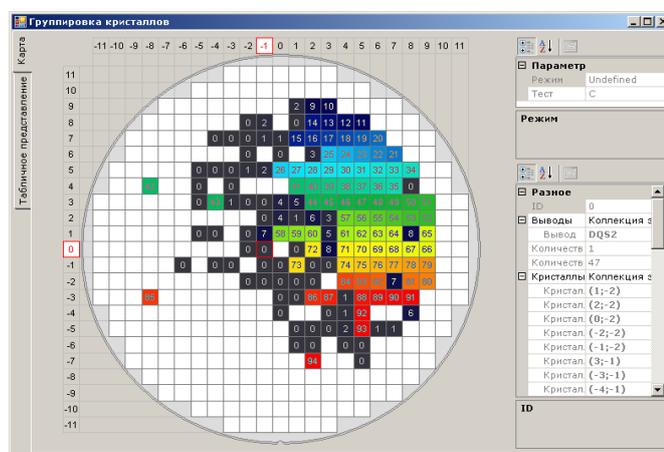


Рисунок 9 – Инструмент группировки кристаллов

Для исключения из анализа кристаллов у которых измеряемый параметр вышел за границы допустимых по причине плохого контактирования зондовых игл или повреждения контактных площадок процессный технолог имеет возможность просмотра фотографий моментов до и после контактирования зондовых игл (рисунок 10).

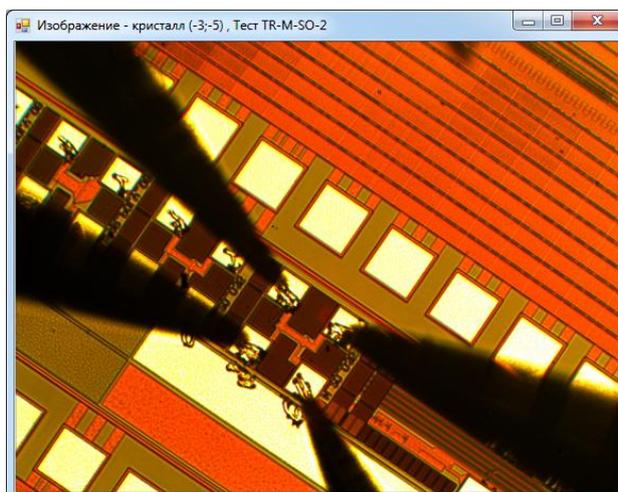


Рисунок 10 – Просмотр фотографии момента контактирования зондовых игл

Для получения информации со всего измерительного оборудования разработаны программы-клиенты, взаимодействующие с Sigma Viewer и позволяющие проводить оценку результатов в режиме реального времени. Программы-клиенты могут располагаться как в одной локальной сети, так и подключены через шлюз к другой сети. Это позволяет получать результаты измерения с измерительного оборудования, находящегося на других территориях или из сторонних испытательных центров, проводящих квалификационные испытания. Это позволяет оперативно сравнивать результаты измерений, полученных на различных стадиях испытания. Для удобства доступа к результатам измерений реализован интерфейс поиска отчетов по их метаданным - номерам пластин, номерам сопроводительных листов.

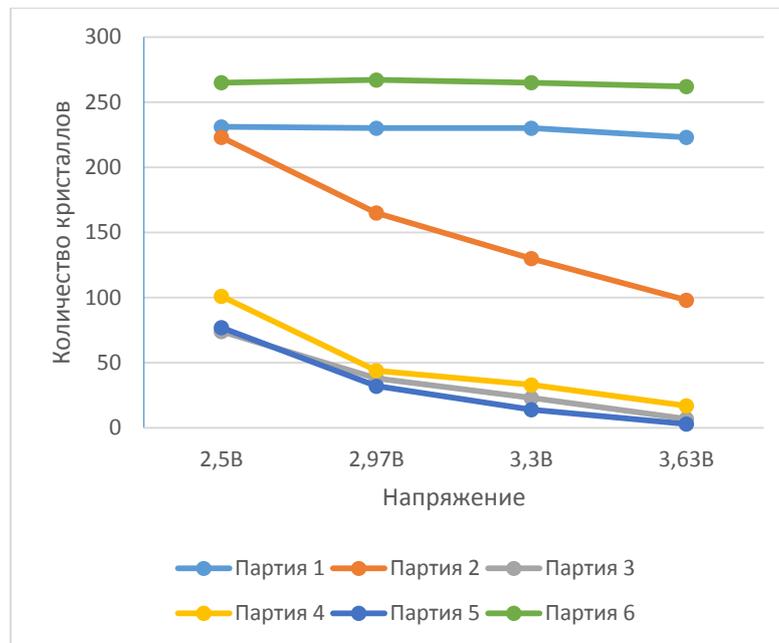


Рисунок 10 – Зависимость количества кристаллов в партии, прошедших тесты CHESSE, MARCH, GALROW от напряжения питания

При анализе отказов требуется провести межоперационный анализ результатов или сравнить результаты измерения изделий из разных партий. Примером такого анализа является оценка зависимости количества кристаллов СБИС СОЗУ, успешно прошедших тесты CHESSE, MARCH, GALROW от напряжения питания для пластин, изготовленных по различным фотошаблонам. При решении данной задачи рассматривались результаты 6 партий пластин (30 полупроводниковых пластин), изготовленных по разным фотошаблонам, протестированных на 4 температурах при 4 напряжениях питания. Суммарный объем полученных данных был равен 192 Гб. При помощи встроенного в систему Sigma Viewer скриптового языка была разработана программа, сравнивающая результаты измерения пластин и представляющая результаты в виде диаграммы (рисунок 10) и интегральной топологической модели кристалла (рисунок 11), отражающую число отказов каждой ячейки памяти каждой пластины.

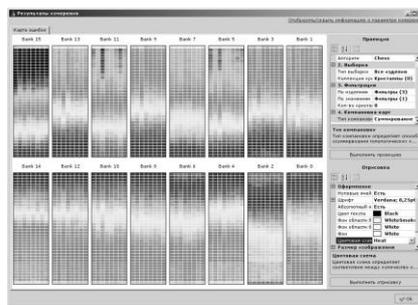


Рисунок 11 - Интегральная топологическая модель всех кристаллов пластины

Выводы

Разработан программный комплекс, который позволил решить задачи сохранения результатов тестирования на всех этапах производства микросхем с привязкой к серийным номерам выпускаемой продукции и сопроводительной документации. Программный комплекс позволил обеспечить единообразный доступ к результатам измерений сотрудникам различных предприятий и объединить все измерительное оборудование, находящиеся на разных территориях в единое информационное пространство.

Обеспечена возможность анализа результатов измерений, полученных с различных технологических операций и их сравнение между партиями продукции а также проведения корреляционного анализа измеренных параметров на разных этапах производства с целью выявления потенциально-ненадежных СБИС на ранних этапах производства.

Приведены примеры построения вариативных функциональных тестов, алгоритм, которых формируется динамически во время выполнения и зависит от результатов тестирования изделия на предыдущих технологических операциях.

Библиографический список

1. Смирнов К.К., Ефимов Е.Н. Организация прослеживаемости предметов труда при проведении функционального контроля СБИС // Труды НИИСИ РАН. 2014. Т. 4. № 1. С. 40-44.
2. Бухтеев А.В. Методы и средства проектирования систем на кристалле // Chip news. 2003. № 4. С. 4–14.
3. Бобков С.Г. Методика тестирования микросхем для компьютеров серии “багет” // Программные продукты и системы. 2007. № 3. С. 2-5.
4. J. Hudec. Methodology of functional test synthesis and verification for VLSI systems // TI 2000. Proceedings of the 22nd International Conference on Information Technology Interfaces (Cat. No.00EX411), 2000, pp. 61-66.
5. Смирнов К.К., Бубнова М.Д. Среда для подготовки программ функционального контроля // Труды НИИСИ РАН. 2014. Т.4. № 1. С. 32-39.
6. Смирнов К.К., Описание функциональных возможностей среды FTStudio для разработки кроссплатформенных функциональных тестов СБИС // Труды НИИСИ РАН. 2015. Т. 5. № 1. С. 114-121.
7. Ерошин Е.В. Методы и аппаратура для функционального контроля ОЗУ на МОП структурах: Дисс. канд. техн. наук. - Челябинск, 1984. – 230 с.
8. Дембицкий Н.Л, Луценко А.В., Фам В.А. Экспертная система технологической подготовки процесса сборки и монтажа узлов бортовой радиоаппаратуры // Труды МАИ. 2015. № 83. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=62213>

9. Добряков В.А., Енгалычев А.Н., Назаров А.В. Начальное размещение базовых элементов комплементарных металл-окисел-полупроводниковых больших интегральных схем методом случайных назначений // Труды МАИ. 2014. № 72. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=47562>
10. Чистяков М.Г., Назаров А.В., Морозов С.А. Методология проектирования радиационно-стойких элементов для САПР электронно-компонентной базы типа «система-на-кристалле // Труды МАИ. 2016. № 90. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=74853>