

In clause is submitted procedure of reduction of uncertainty during creation ontology. The informal description of semantic search and diagram of a sequence UML as the tool of general formalization is considered. Is offered and the general structure of semantic search supporting principles of a researched method of formalization ontology is generated.

УДК 681.4

Дудкин А.А.

КОНТРОЛЬ ТОПОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА БАЗЕ СИСТЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Введение. Топология интегральных схем (ИС) представляет собой множество геометрических фигур, расположенных в различных топологических слоях. В одном топологическом слое объединены фигуры, которые будут перенесены на один фотоматрицу (ФМ). Некоторое множество фигур в одном или в нескольких топологических слоях объединяются в топологическую группу. Основными фигурами (примитивами), составляющими топологическую группу, являются: ортогональный прямоугольник; многоугольник или шина (со сторонами под углами, кратными 45°); экспозиция (наклонный прямоугольник с произвольным, кратным некоторому заданному значению углом наклона сторон). Эти примитивы имеют замкнутый контур и формируют рисунок на ФМ. Другие два примитива – текст и линия – рисунка на ФМ не формируют и предназначены для создания поясняющих надписей и рисунков в топологии. Топологическая группа, кроме геометрических фигур, может содержать в себе ссылки на другие группы, формируя иерархическое описание топологии ИС.

Разработка топологий ИС осуществляется с помощью САПР [1]. При этом крупные компании используют продукцию таких фирм, как Cadence Design System, Synopsys, Mentor Graphics Corporation и Magma Design Automation, а большинство мелких фирм – программы СТАЛКЕР и GLE, систему верификации и редактор топологий OT-TO 2000 компании OT-TO Software Group [2], а также редактор топологии LayEdit 2.0 компании General Design System [3]. После получения описания топологии осуществляются ее верификация, контроль геометрических и электрических проектных норм. При этом используются значения конструкторско-технологических ограничений (КТО) для используемой интегральной технологии. Любые нарушения ограничений отмечаются как дефекты.

После завершения контроля КТО описание топологии преобразуется в описание электрической схемы в виде таблицы целей (например, текстовое описание в формате SPICE). Эта таблица передается в блок верификации логических и электрических схем, где проводятся перекрестная проверка описанной схемы на логическом и топологическом уровнях, а также повторное моделирование и контроль электрических проектных норм. В результате идентифициру-

ются все нераспознанные или неправильно соединенные элементы, а также все нарушения электрических проектных норм. Далее разработанная топология в формате GDSII передается на завод, который изготавливает набор ФМ и воплощает изделие в кремнии на своем оборудовании. Ответственность за функциональные характеристики БИС полностью лежит на ее разработчике, а завод гарантирует качество технологического процесса.

Покажем источник дефектов топологии ИС на примере планарной технологии, которая позволяет получать большинство элементов в течение единого технологического процесса. Под планарной технологией понимают совокупность групповых технологических методов обработки участков монокристалла кремния, с помощью которых электронно-дырочные переходы получают локальной диффузией примесей с применением масок. В планарной технологии многократно повторяются однотипные операции для создания различных по структуре ИС. Как правило, большинство дефектов ИС являются производственными и обусловлены технологией фотолитографии. Перенос рисунка топологии в поверхностный слой подложки методом фотолитографии происходит в четыре стадии (рис. 1): экспонирование слоя фоторезиста через ФМ и образование скрытого изображения; проявление и формирование защитной маски; травление поверхности подложки на незащищенных участках; очистка поверхности подложки от остатков фоторезиста [4]. Цель литографического процесса – образование фоторезистивной маски, которая служит для локальной обработки нижележащего слоя подложки, либо сама является требуемым микрорельефом элемента.

На каждой из стадий процесса действуют факторы, искажающие исходный рисунок ФМ. При экспонировании имеют место явления дифракции, преломления и отражения света, приводящие к изменению размеров элементов рисунка и размытости их краев. На этапе проявления искажения размеров обусловлены набуханием слоя фоторезиста и усадкой фотомаски при тепловой обработке. При травлении негативным фактором является боковое подтравливание под маску. Условия, в которых происходит обработка на разных стадиях, изменяются как от пластины к пластине, так и в пределах



Рис. 1. Процесс формирования микрорельефа в подложке

Дудкин Александр Арсентьевич, к.т.н., ведущий научный сотрудник ГНУ "Объединенный институт проблем информатики" НАН Беларуси. Беларусь. 220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6

Физика, математика, информатика

од
рс
ре
К
от
пр
(р
эл
ра

кре
род
зив
прс
ных
зам
ме
да
дол
дол
рас

Фис

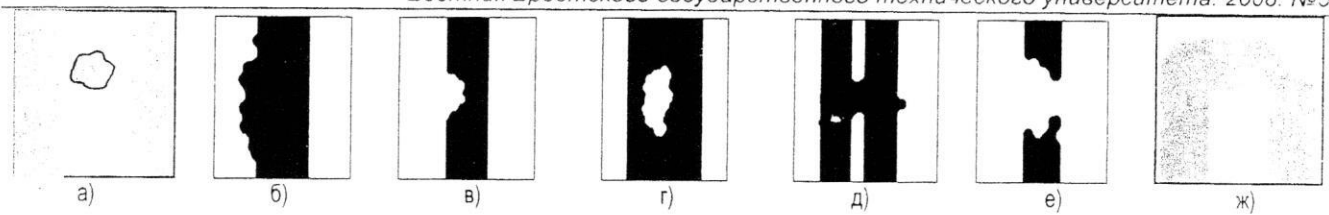


Рис. 2. Основные дефекты топологии ИС

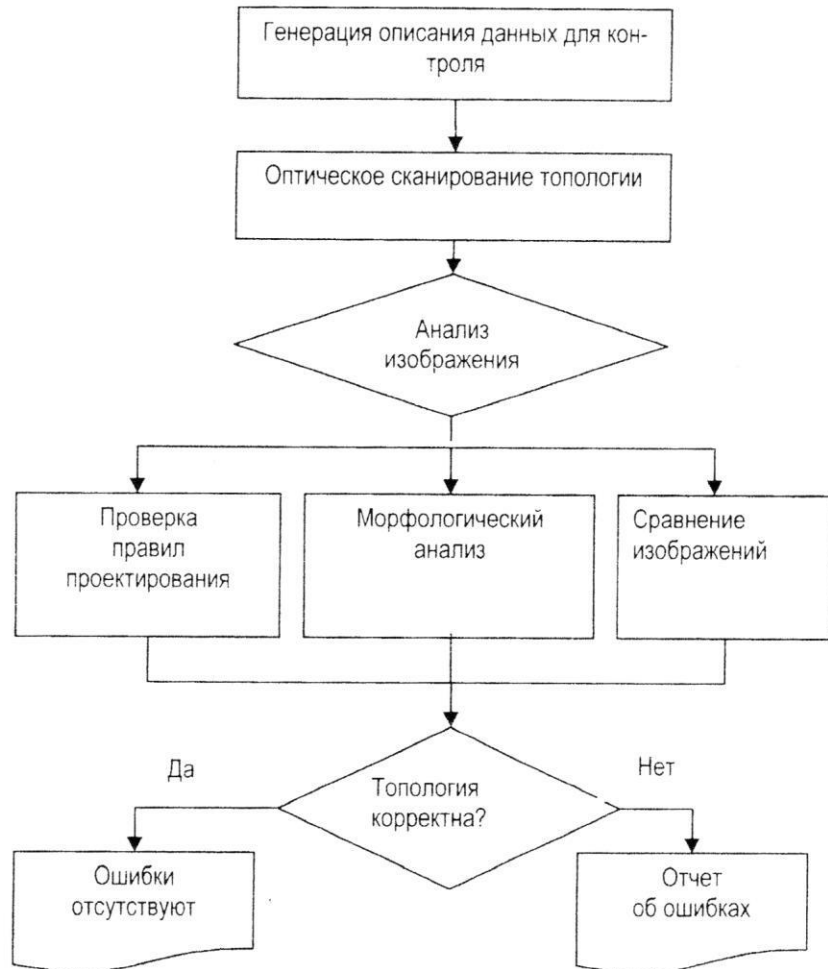


Рис. 3. Комбинированная техника контроля

одной пластины. Это приводит к разбросу геометрических параметров элемента и его характеристик, что следует учитывать при выборе технологии изготовления.

К производственным дефектам топологического слоя ИС или ФШ относятся: островок (рис. 2, а), выступ (рис. 2, б), вырыв (рис. 2, в), прокол (рис. 2, г), замыкание или перемычка между элементами (рис. 2, д), разрыв (рис. 2, е), скругление углов (рис. 2, ж), отсутствие элемента, смещение элемента, ложный элемент, нарушение размера, отсутствие/избыток покрытия.

Далее для примера покажем некоторые из дефектов и их конкретные причины: загрязнения, отсутствие резиста, вкрапления инородных материалов и др. Так, прокол может быть следствием коррозии в слое металлизации и других слоях, а также присутствия токопроводящих примесей, которые могут замкнуть два или более смежных слоя. К дефектам относятся вкрапления в кристалле, которые замыкают два активных элемента схемы, либо уменьшают зазор между двумя активными элементами схемы, например, для арсенида галлия - более чем на 50 %. В области активных элементов не должно быть сколов на краю кристалла. При этом любой скол не должен превышать заданного размера. В зависимости от размера и расположения, причиной дефектов могут быть и трещины.

Важной проблемой при производстве электронного оборудования является контроль качества ИС на различных технологических этапах. Для этого могут применяться как контактные (электрические), так и бесконтактные методы [5]. Электрический метод контроля имеет ограничения по использованию: применяется не на всех стадиях производства ИС. Бесконтактные методы контролируют только изображение, полученное в разных диапазонах, и могут быть оптическими, рентгеновскими, томографическими, ультразвуковыми и инфракрасными.

Рентгеновский метод контроля используется для точного контроля и может определять такой дефект, как сверхтонкий разрыв проводника, который невозможно найти другими бесконтактными методами. Томографический метод использует сканирующий луч для формирования послойного представления топологии как набора отдельных изображений. Данный метод обуславливает адаптацию точности сканирования в зависимости от размера элементов на топологическом слое, т. е. мелкие элементы можно контролировать с высоким разрешением, а остальные – с обычным, что ускоряет процесс контроля. Использование ультразвука для контроля позволяет определять скрытые дефекты, такие, как пустоты, разрывы и отслоения проводников. Инфракрасный или тепловой метод контроля

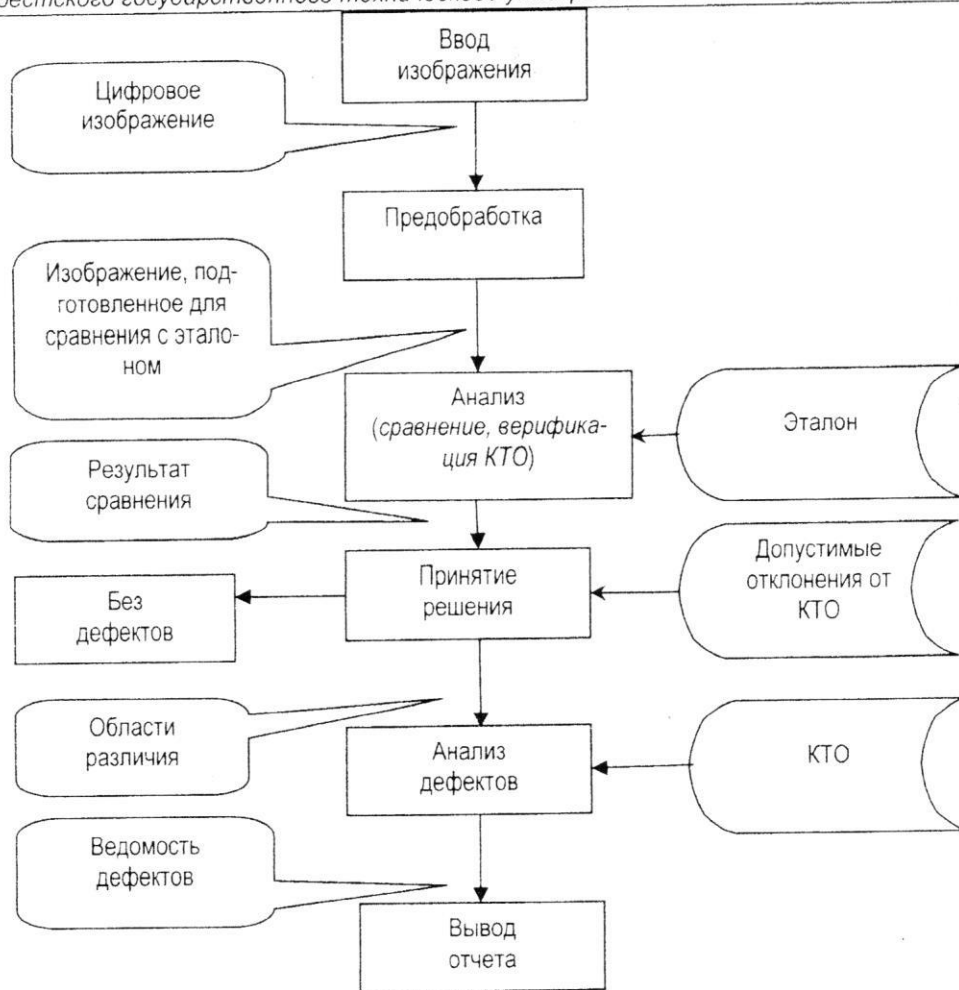


Рис. 4. Типичная схема системы нахождения дефектов ИС и ФШ

может находить места коротких замыканий и перегруженных элементов на плате по их нагреву в процессе работы, а также использоваться для контроля паяных соединений.

В оптическом методе используются изображения ИС в видимом диапазоне. Данный метод является более универсальным по сравнению с другими бесконтактными методами и дешевым по сравнению с контактными: зачастую обнаруженные с его помощью дефекты могут быть исправлены, если это позволяет технология производства.

Задача оптического контроля состоит в обнаружении дефектов на ИС либо ФШ, возникших в ходе изготовления или подготовки данных. Она заключается в проверке качества металлизации соединений и контактных окон (при анализе металлизации ИС), апертурных элементов (при анализе ФШ), поликремниевых и диффузионных областей (при анализе ИС). Один из шагов на пути к высокому уровню качества – контроль дефектов и обнаружение их источников с применением систем технического (компьютерного) зрения (СТЗ) [6-8], которые позволяют в автоматическом режиме определить до 90 % дефектов, что делает стратегию управления качеством производственного процесса эффективной, так как плотность компонент ИС и ПП увеличивается. По сравнению с визуальным контролем использование СТЗ имеет следующие преимущества: более низкую стоимость дефекта, обусловленную ранним детектированием, что дает возможность избежать дефектов на поздних шагах, когда их стоимость выше; возможность непрерывного контроля процесса производства; сокращение времени контроля.

Методы контроля. В СТЗ контроля используются методы морфологических описаний, сравнения с эталоном, контроля структурно-технологических ограничений (КТО) и гибридные [6, 9].

Метод морфологических описаний, заимствованный из области распознавания образов, в комбинации с некоторыми базовыми критериями правил проектирования позволяет определять ошибки проектирования. Суть метода заключается в том, что изображение топологии анализируется и представляется как список признаков или образов. Каждый образ классифицируется и определяется его позиция. Список эталонных признаков формируется САПР либо СТЗ из эталонного изображения топологии ИС или ФШ. Далее списки признаков анализируемого образца сравниваются с эталонным списком и любые различия фиксируются как ошибки.

Метод ориентирован на специфику типа топологии и ее изображения, для каждого из которых разрабатываются модели и алгоритмы. Если контролируется слой соединений, то используется математический и алгоритмический аппарат для детекции ошибок соединений. Когда же проверяется слой питания и земли, используется другой аппарат, так как образы проводников отличаются от образов на слое питания и земли, что, по существу, требует анализа другого типа, например, синтаксического, сравнения графов и т. д.

Если на одном слое имеются сочетания разных типов объектов, например, проводников и элементов питания, то требуются дополнительные средства для контроля нетипичных областей.

Данный метод позволяет также определить дефект, который проявляется в виде некоторой неоднородности на изображении топологического слоя, например, при попадании на пластину чужеродных частиц. В этом случае для выявления дефектов применяются различные методы анализа текстуры изображения [10].

Метод сравнения с эталоном основан на использовании моделей с заранее определенными информативными признаками в качестве эталона (изображений, получаемых с идеальной топологии или с САПР), с которыми непосредственно сравнивается тестовое изо-

бражение ФП или ИС и фиксируются различия. При сравнении с эталоном возможно как непосредственное попиксельное сравнение тестового изображения с изображением эталонного образца (вычитание изображений), так и выделение и последующее сравнение информативных признаков элементов [9, 11, 12]. Формулируются правила отнесения различия к дефекту. Самое простое правило – «всякое различие есть дефект». Но известно, что среди большого числа ПП практически все слои различаются от эталонных малыми изменениями в травлении, растяжении материала и т. д. Имеют место также и отличия в топологии. То же можно сказать и о топологии слоя ИС; как правило, она не повторяет один к одному топологию, полученную от САПР.

Поэтому важно установить, что считать дефектом. Например, искажение некоторого размера (площади) на проводнике приводит к разрыву и соответственно к дефекту, а в другом месте не является дефектом. Здесь задача состоит в том, как игнорировать те или иные мелкие погрешности. Одни и те же методы используются двояко: за счет параметров можно либо их игнорировать (так поступаем при восстановлении топологии при обратном проектировании), либо выдавать как ошибки с их локализацией (при контроле). Тем самым удается избежать построения большого списка ложных дефектов.

Суть метода контроля проектных норм заключается в проверке элементов топологии на соответствие КТО, таким, как минимальная и максимальная ширина проводников и расстояние между ними; минимальный и максимальный диаметр отверстий на объекте; угол изгиба проводника; контроль правила окончания проводников и т. д. [13]. При этом часто используют операторы математической морфологии: эрозию и дилатацию. Также могут применяться алгоритмы, основанные на анализе границы элементов. После получения границы производится проверка элемента путем движения вдоль границы с контролем специальных параметров. Для поиска дефектов может применяться кодирование длин краев элементов [9]. Детальное описание правил содержится в руководствах и стандартах SEMI, IPC и др.

Каждый из названных методов имеет как свои достоинства, так и недостатки.

Техника сравнения проста и эффективна с точки зрения вычислений, ограничена необходимостью иметь образец, а также требует точного совмещения изображений.

Морфологический подход работает с большим числом форм и требуется постоянная доработка алгоритма контроля. В процессе работы собираются данные, которые затем используются для более точного детектирования.

Проверка правил проектирования основана на идее, что дефектом является участок топологии, который не удовлетворяет проектным спецификациям. Применение процесса верификации правил проектирования непосредственно к изображению образов является затратным по времени и требует больших вычислительных мощностей. Кроме того, проверка правил проектирования приводит к большому числу ложных дефектов. Поэтому важно комбинирование различных методов контроля для достижения лучшего результата (рис. 3). Однако ни один из методов не даст ответа о наличии дефекта, если на одном изображении одни КП соединены с другими, а в то же время есть изолированная КП. В этом случае только дополнительное электрическое тестирование может дать ответ о наличии дефекта. Такой вид контроля получил название автоматический оптический тест (АОТ).

Из систем обработки топологии ИС следует выделить продукты фирмы Mentor Graphics Corporation (Calibre ORC™, Calibre ORCpro™, Calibre PRINTimage™) [14] и КБТЭМ-ОМО концерна «Планар» [15]. Системы автоматической классификации дефектов топологии ИС в настоящее время поставляют две фирмы: Vistec Semiconductor Systems (Leica Microsystems) (Германия) и KLA-Tencor Corporation (США). В 2005 г. на долю систем АОК ИС и ПП (рис. 5) приходилось 54 и 13 % мирового рынка систем соответственно, а оставшаяся доля приходится на микроэлектромеханические и телекоммуникационные (22 %) и ЖК-системы (11 %).

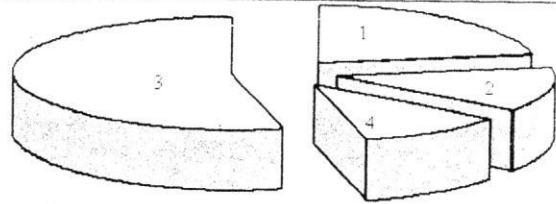


Рис. 5. Диаграмма процентного распределения систем АОК по типам: 1 – микроэлектромеханические и телекоммуникационные; 2 – ЖК; 3 – ИС; 4 – ПП

В разрабатываемых в ОИПИ НАН Беларуси системах обработки и идентификации изображений [16] реализованы два основных метода контроля (см. рис. 3, блок анализа):

1. Метод проверки КТО. Контроль осуществляется в процессе обработки изображений и заключается в проверке, удовлетворяют ли выделяемые объекты заданным КТО. Основными параметрами являются следующие: сегменты, определяющие минимальный размер отрезка, при котором он считается сегментом контура, и допустимые отклонения пикселей от текущего положения сегмента; минимальные размеры топологических объектов и др.

2. Метод сравнения, который позволяет определить геометрические дефекты типа разрывов проводников, отсутствия контактных площадок, нарушения форм объектов и т. п. Для его выполнения дополнительно строятся эталонные изображения топологических слоев по данным, получаемым от САПР СБИС, и формируются списки эталонных элементов. Выполняется поиск эталонных элементов на тестовом изображении и их сравнение с эталонными, в результате получаем описания дефектов для каждого элемента, а также списки ненайденных элементов.

Заключение

Для создания эффективных технологий контроля разрабатываемые методы и алгоритмы должны удовлетворять ряду требований по быстродействию и точности. Обычно каждый алгоритм, обладая определенными характеристиками, «специализируется» на своем типе изображения. Поэтому в системах оптического контроля необходимо сочетание нескольких методов, которые решают одну и ту же задачу различными способами, обеспечивая при этом необходимые показатели по быстродействию и достоверности идентификации. В свою очередь, для эффективного функционирования систем необходимо постоянное пополнение методов и средств предварительной обработки, сжатия изображений и построения классификаторов, что обуславливает необходимость открытости указанных систем, а также потребность в инструментари для их проектирования.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Библио, П.Н. Системы проектирования интегральных схем на основе языка VHDL State CAD, ModelSim, LeonardoSpectrum / П.Н. Библио. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 384 с.
2. Система верификации топологии интегральных схем OT_TO [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа: http://www.rodnik.ru/htmls/f_1_8.htm. – Дата доступа: 26.05.2007.
3. Майстренко, А. Услуги разработчикам электронной техники: от составления схемы до изготовления корпуса / А. Майстренко // Chips News. – 2004. – № 4 (87).
4. Черняев, В.Н. Технология производства интегральных микросхем / В.Н. Черняев – М.: Энергия, 1977. – 376 с.
5. Colvin, J. ESD Failure Analysis Methodology / J. Colvin // Microelectronics and Reliability. – 1998. – Vol. 38. – P. 1705-1714.
6. Malamas, Elias N. A survey on industrial vision systems, applications, tools / Elias N. Malamas // Image Vision Computing. – 2003. – Vol. 21, iss. 2. – P. 171-188.
7. Ma, M. Design, Mask, and Manufacturability / M. Ma [et al.] // 24th Annual BACUS Symposium on Photomask Technology, 14-17 September, 2004, Monterey, USA. – Proc. of SPIE. – 2004. – Vol. 5567. – P. 137-146 [Electronic resource]. – 2004. – Mode of access: http://spie.org/x648.xml?product_id=569309. – Date of access: 23.03.2008.