



УДК 519.688

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.250.253

ГЕНЕРАЦИЯ ТОПОЛОГИИ СЛУЧАЙНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ДЛЯ ОТРАБОТКИ OPC-МОДЕЛИ

GENERATING RANDOM CONFIGURATION TOPOLOGY FOR OPC-MODEL TESTING

ИПАТОВА ЕВГЕНИЯ ВАСИЛЬЕВНА

eipatova@niime.ru

IPATOVA EVGENIYA V.

eipatova@niime.ru

ХАРЧЕНКО ЕКАТЕРИНА ЛЕОНИДОВНА

ekharchenko@niime.ru

KHARCHENKO EKATERINA L.

ekharchenko@niime.ru

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград,

1-й Западный проезд, 12, стр. 1

Molecular Electronics Research Institute JSC

bld. 1, 12 1st Zapadny Lane, Zelenograd,

Moscow, 124460, Russia

Для оценки эффективности OPC-решения необходимо подбирать тестовые структуры, имеющие разнообразные топологические формы. В связи с этим актуальной является задача автоматизированного создания топологии случайной конфигурации. В данной работе представлены разработанная методика генерации топологии случайной конфигурации, программная реализация и исследование эффективности ее применения.

Ключевые слова: OPC-модель; топология; тестовые структуры; фотолитография; фрагментация.

It is necessary to select test structures with a variety of topological forms. That is why the task of automated creation of a random configuration topology is relevant. This paper presents the developed method of generating a random configuration topology.

Keywords: OPC-model; topology; test patterns; photolithography; fragmentation.

С уменьшением проектных норм важную роль в процессе проектирования фотошаблонов и обеспечении качества интегральных схем играет этап коррекции эффектов оптической близости (Optical proximity correction, OPC) [1]. Для оценки эффективности OPC-решения необходимо подбирать тестовые структуры, имеющие разнообразные топологические формы, из-за чего структуры технологического контроля не всегда могут охватить весь спектр областей возможного проявления эффекта оптической близости. В связи с этим актуальной является задача обеспечения разработчиков OPC качественными тестовыми структурами.

Целью работы являются исследование и разработка эффективной методики генерации топологии критических слоев для тестирования OPC-рецептов, применимой для КМОП-технологий уровня 90 нм и ниже. Для достижения поставленных целей необходимо решить следующие задачи:

- исследовать достоинства и недостатки существующих методик генерации топологии критических слоев, опередить требования, предъявляемые к методике;
- разработать методику генерации топологии случайной конфигурации в соответствии с предъявляемыми требованиями;
- разработать программный комплекс, реализующий разработанную методику для технологии HСMOS10LP ПАО «Микрон» с проектными нормами 90 нм;
- провести экспериментальное исследование эффективности применения разработанного программного комплекса в рамках калибровки модели коррекции эффектов оптической близости в целях определения эффективности разработанной методики.

Наибольшее распространение в качестве объекта отработки OPC-рецепта получили параметрические тестовые структуры.

Параметрические тестовые структуры представляют собой предопределенные группы геометрий, которые не имеют схематической функции, но при комбинировании с другими геометриями тестового набора могут имитировать функциональные элементы дизайна [2]. Данный подход имеет неоспоримые преимущества, однако в рамках непрерывно усложняющихся технологий появляется необходимость предугадывать возможные литографические опасные точки, что данные структуры обеспечить не могут. Перспективным выходом может являться тестовый модуль на основе топологии случайной конфигурации, гипотетически способный отследить большее количество критических структур [3]. Однако для формирования подобного модуля необходимы разработка и создание метода генерации тестовых структур случайного характера, способного имитировать реалистичный дизайн топологии.

МЕТОДИКА ГЕНЕРАЦИИ ТОПОЛОГИИ СЛУЧАЙНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Так как принцип построения топологии случайного характера направлен на создание тестовых блоков для отработки OPC-рецепта, которые применяются на этапе компьютерного моделирования в целях оптимизации OPC-рецепта для фрагментации, то необходимо учитывать целевые особенности данных задач. Основными требованиями к генерации топологии случайной конфигурации являются:

- универсальность при переходе между разными технологическими базами;
- максимальное разнообразие структур;
- вариативность параметров, определяющих дизайн структур;
- возможность внесения структур по желанию разработчика;



- вариативность размера итоговой топологии;
- минимальное время создания топологии;
- имитация реалистичного дизайна топологии;
- соответствие правилам проектирования.

На основе вышеперечисленных требований в рамках данной работы создана методика генерации топологии случайной конфигурации для отработки ОРС-решений. Для реализации выбран язык программирования TCL. Проверка на соответствие правилам проектирования производится с помощью САПР Mentor Graphics Calibre WorkBench. В основу разработки программного комплекса взята КМОП-технология 90 нм HCMOS10LP.

Для удовлетворения требованиям, предъявляемым к топологии случайного характера, принято решение формировать топологию из элементарных блоков, отражающих основные структурные единицы реального дизайна топологии. Выделено пять видов элементарных блоков. Каждому блоку соответствует параметр угла поворота для обеспечения наиболее полного набора структур.

Для регулирования предпочтительного дизайна и создания определенной стилистики построения каждому блоку в соответствие ставится параметр веса. Вес определяет вероятность, с которой данный элементарный блок будет поставлен в топологию. Для управления ориентацией топологии задается вес угла поворота каждой структуры. Данные параметры позволяют достаточно точно задавать желаемый дизайн топологии.

Для того чтобы программный комплекс был более гибким, а пользователь имел возможность вставить в будущий тестовый блок структуры, которые его интересуют, осуществлена функция задания предопределенных структур. Пользователю предоставляется возможность задать как одиночный элемент, указав координаты положения элемента в массиве, так и целые строки и столбцы.

Обеспечение реалистичного дизайна топологии осуществляется за счет проверки на соответствие правилам проектирования. Расстановка блоков осуществляется с помощью метода на основе поэлементной проверки правил проектирования. Данный метод можно подразделить на следующие этапы.

1. Подготовительный этап. Включает в себя загрузку входных данных, создание пустого файла топологии, создание ячеек элементарных блоков, расстановку предопределенных блоков, формирование Ctrl-файла, осуществляющего сортировку правил проектирования по описанным ранее условиям. Ctrl-файл формируется путем обработки проверочного DRC-файла на предмет поиска ключевых слов. Последней частью подготовительного этапа является формирование файла Runset, содержащего необходимые настройки для проведения DRC-проверки в фоновом режиме.
2. Основной этап. На данном этапе осуществляется формирование топологии. Генерируется два случайных числа от 0 до 1, на основании которых выбираются наименование случайного блока и угол его поворота. Формируется привязка выбранного блока в нулевую координату топологии. Далее в фоновом режиме проводится проверка топологии на наличие ошибок проектирования. Если найдена ошибка, то блок удаляется и цикл начинается заново. Если нет, то программа переходит в следующую итерацию.
3. Заключительный этап. На данном этапе формируются отчеты о процессе работы программы и наличии ошибок, после чего работа программного комплекса завершается.

Описанный метод формирования топологии является максимально гибким относительно технологического базиса, однако по итогам моделирования было выявлено, что он требует слишком большого количества времени, из-за чего возникла необходимость реорганизации процесса формирования топологии. В ходе работы были рассмотрены два метода: на основе генетического алгоритма и итерационный.

Метод на основе генетического алгоритма

Подход к формированию топологии случайной конфигурации на основе генетического алгоритма основывается на идее скрещивания двух тестовых блоков-родителей. Он включает следующие этапы.

1. Подготовительный этап. Данный этап по наполнению совпадает с подготовительным этапом описанного ранее метода с поэлементной проверкой правил проектирования.
2. Этап генерации первого поколения топологий-родителей. На данном этапе случайным образом формируются две топологии-родителя. Кроме того, формируются два массива, содержащих информацию о ячейках массива топологии: название привязанной ячейки, угол поворота.
3. Промежуточный этап. На этом этапе происходит выгрузка первого поколения топологий-родителей, проверка топологий на соответствие правилам проектирования и анализ числа ошибок.
4. Вычисление функции приспособленности. Вычисление функции приспособленности производится на основе сравнения количества выявленных нарушений правил проектирования: чем меньше количество DRC-ошибок, тем выше выживаемость у особи. По результатам данного этапа будет выявлена предпочтительная топология-родитель.
5. Этап формирования топологии без ошибок. Данный этап содержит в себе этапы скрещивания, мутации и селекции. Его можно разделить на несколько подэтапов.
 - Поиск элементов, создающих нарушение правил проектирования, в топологиях-родителях. На данном этапе производится поиск номеров элементов массива, создающих нарушение правил проектирования. Поиск производится на основе файла-отчета о результатах проверки. Данный файл используется для визуализации DRC-ошибок с помощью инструмента RVE и содержит координаты областей, определяющих нарушение правил проектирования. С помощью координат ошибок определяется положение элементов, создающих ошибку, в массиве топологии.
 - На основе результатов поиска элементарных блоков, нарушающих правила проектирования, в топологиях-родителях удаляются данные блоки.
 - Формирование потомства. На пустые позиции массива топологии-родителя, признанного предпочтительным, копируются элементы из второй особи первого поколения. Оставшиеся пустые элементы массива заполняются случайным образом, формируя этап мутации. Таким образом, на базе одного из родителей первого поколения формируется потомок. Второй потомок следующего поколения формируется на базе второй топологии-родителя, у которого пустые элементы массива заполняются случайным образом.
 - Топологии потомков проверяются на соответствие правилам проектирования. Если общее число ошибок в одном из потомков стало меньше выявленного



на промежуточном этапе, то начинается новая итерация. Если нет, то этап скрещивания проводится заново. В ситуации, когда количество ошибок равно нулю, выполнение этапа формирования топологии без ошибок завершается.

6. Заключительный этап. На данном этапе формируются отчеты о процессе работы программы и наличии ошибок, после чего работа программного комплекса завершается.

Итерационный метод

Метод построения топологии случайной конфигурации на основе итерационного подхода опирается на идею одновременной замены элементов, создающих нарушение правил проектирования, до тех пор пока количество ошибок не станет равно нулю. Метод включает следующие этапы.

1. Подготовительный этап. Данный этап по наполнению совпадает с подготовительным этапом описанного ранее метода с поэлементной проверкой правил проектирования.
2. Этап генерации первичной топологии. На данном этапе случайным образом формируется топология по принципу, описанному в предыдущем методе. Кроме того, формируется массив, содержащий информацию о каждой ячейке массива топологии: название привязанной ячейки, угол поворота.
3. Промежуточный этап. На этом этапе происходит выгрузка первичной топологии, проверка данной топологии на соответствие правилам проектирования и анализ числа ошибок.
4. Этап формирования топологии без ошибок. Данный этап можно разделить на два подэтапа.
 - Поиск элементов, создающих нарушение правил проектирования. На данном этапе производится поиск номеров элементов массива, которые участвуют в качестве элементов, создающих DRC-ошибку.
 - Замена элементов. Далее проводится замена элементов, создающих нарушение правил проектирования, на новые случайно сгенерированные. После этого формируется новая топология, проводится проверка на соответствие правилам проектирования. Если общее число ошибок стало меньше выявленного на промежуточном этапе, то начинается новая итерация. Если нет, то этап замены элементов проводится заново. В ситуации, когда количество ошибок равно нулю, выполнение этапа формирования топологии без ошибок завершается.
5. Заключительный этап. На данном этапе формируются отчеты о процессе работы программы и наличии ошибок, после чего работа программного комплекса завершается.

Выводы

По результатам моделирования итерационный метод показал наилучшие временные характеристики. Временной выигрыш по сравнению с подходом, основанным на поэлементной проверке правил проектирования, составляет приблизительно 98 %. Временной выигрыш по сравнению с подходом, основанным на идее генетического алгоритма, составляет 15–20 % в зависимости от размера массива генерируемой топологии. Данный метод имеет меньшую гибкость относительно технологического базиса по сравнению с методом поэлементной проверки, однако имеет достаточный охват относительно технологий, требующих применения ОРС. На основе итерационного метода разработан программный модуль, реализующий предложенную методику генерации топологии случайной конфигурации.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТОПОЛОГИИ СЛУЧАЙНОЙ КОНФИГУРАЦИИ В КАЧЕСТВЕ ТЕСТОВОГО БЛОКА

Основное преимущество случайного принципа построения топологии состоит в гипотетической возможности обнаружения не выявленных ранее литографически опасных точек [4]. Однако данную гипотезу необходимо подтвердить на практике. Кроме того, необходимо исследовать возможность применения топологии случайной конфигурации в качестве тестового блока.

В рамках исследования разработан набор из 204 тестовых модулей на основе технологии HCMOS10LP 90 нм слоя первого уровня разводки. Для выбора параметров генерации анализировались тестовые структуры, использованные при калибровке существующей ОРС-модели. При генерации тестовых модулей применялись четыре рецепта построения топологии, которые отражают разные виды дизайна.

Выявление литографических опасных точек осуществлялось с помощью оптического моделирования, в частности коэффициента ошибки размещения грани. Данный коэффициент отражает расстояние, на которое различаются грань полигона в топологии и грань результирующей структуры, высчитанной с помощью моделирования. Пороговые значения коэффициента выбраны на основе материалов о калибровке текущей модели коррекции эффектов оптической близости.

Для оценки эффективности применения предложенной методики в рамках калибровки модели коррекции эффектов оптической близости необходимо не только выявить горячие точки, но и отфильтровать горячие точки, представленные в рамках параметрических тестовых структур. Для этого использовался метод на основе поисковой таблицы.

Изначально подготавливается набор эталонов, с которыми будет производиться сравнение. Обрабатываемый фрагмент топологии и эталоны разделяются на пиксели, каждому из которых в зависимости от наличия в нем полигона присваивается коэффициент:

- положительные и отрицательные для эталона, расчет производится по формуле

$$|K_{p+(-)}| = \frac{1}{N_{p+(-)}};$$

- 0 и 1 для фрагмента топологии.

Далее высчитывается коэффициент соответствия с помощью перемножения коэффициентов соответствующих пикселей эталона и обрабатываемого фрагмента топологии и суммирования полученных значений по всем пикселям. Совпадение выявлено в случае, если коэффициент соответствия равен 1. На основе описанного метода разработан программный модуль, организовавший поиск совпадающих структур.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В табл. 1 приведена общая сводка обнаруженных горячих точек. В первом столбце представлено количество опасных точек, выявленных в тестовых модулях с помощью коэффициента ошибки размещения грани. Во втором столбце приведена информация о количестве опасных точек, совпадающих с опасными точками, представленными с помощью параметрических тестовых структур. В третьем столбце приведено количество уникальных опасных точек, которые выявлены с помощью топологии случайной конфигурации.



Таблица 1. Результат поиска горячих точек в тестовых модулях, сгенерированных случайным образом

Общее количество опасных точек	Опасные точки, описанные с помощью параметрических тестовых структур	Уникальные опасные точки	Итоговое количество опасных точек после ОРС
19390	6525	12865	257

Анализируя полученное количество уникальных опасных точек, можно утверждать, что использование блоков случайного характера построения позволяет получить нетипичные топологические структуры, не описанные с помощью параметрических тестов.

Для выявления уязвимостей текущей ОРС-модели и фильтрации опасных точек, которые она способна исправить, проведена коррекция эффектов оптической близости для всех тестовых блоков. Общее количество опасных точек, сохраняющих недопустимое значение коэффициента ошибки размещения грани после проведения ОРС, представлено в 4-м столбце. Полученные результаты позволяют увеличить точность текущей ОРС-модели, что в будущем поможет избежать критических искажений рисунка на пластине и увеличить выход годных.

В процессе исследования выявлены уникальные литографические опасные точки, сохраняющие недопустимое значение ошибки размещения грани даже после проведения коррекции эффектов оптической близости, что доказывает эффективность применения предложенной методики и разработанного программного комплекса для генерации топологии тестовых блоков.

Однако следует учитывать, что не каждая выявленная литографическая опасная точка может встретиться в реальном дизайне топологии. Разработчику необходимо учитывать уникальные особенности исследуемых им структур и подготавливать для каждого типа свой рецепт содержания элементарных блоков, что позволит значительно сузить область рассматриваемых топологических конфигураций.

Авторы считают, что в этой статье являются новыми следующие положения и результаты: методика генерации топологии критических слоев для калибровки модели коррекции эффектов оптической близости, программная реализация разработанной методики, полученные результаты исследования эффективности применения данной методики и программного комплекса.

Результаты проведенного исследования также помогают сформулировать дальнейшие пути развития данного направления:

- доработка программного модуля по сопоставлению топологических структур на соответствие: расширение базы эталонов, сокращение времени работы программного модуля, добавление возможности экстракции области топологии, содержащей литографическую опасную точку;
- сокращение времени работы программного комплекса по генерации топологии случайной конфигурации;
- расширение функционала программного комплекса по генерации топологии случайной конфигурации: добавление возможности использования множественных шаблонов;
- разработка программного комплекса по обнаружению принципиально новых литографических опасных точек в целях формирования эффективной тестовой выборки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Просий А.Д., Ранчин С.О., Шелепин Н.А. Обеспечение качества в современном полупроводниковом производстве // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, № 161.
2. Красников Г.Я., Горнев Е.С. Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон», история отечественной электроники. В 2 томах. — М., 2013.
3. Joong-Won Jeon, Jaewan Song, Jeong-Lim Kim, Seongyul Park, Seung-Hune Yang, Sooryong Lee, Hokyu Kang, Kareem Madkour, Wael ElManhawy, SeungJo Lee, Joe Kwan. *Early stage hot spot analysis through standard cell base random pattern generation* // Proc. SPIE 10148, Design-Process-Technology Co-optimization for Manufacturability XI, 101480S (4 April 2017).
4. Tom Wong, Ravi Ravikumar. *DFM methodology for automatic layout hot spot removal* // Proc. SPIE 6607, Photomask and Next-Generation Lithography Mask Technology XIV, 66070P (12 May 2007).