

Верстов Владимир Александрович

**ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ТРАНСФОРМАЦИИ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО
СЛОЯ ЦИФРОВОЙ СХЕМЫ ПРИ НАЛИЧИИ ОГРАНИЧЕНИЙ
ТЕХНОЛОГИИ ДВОЙНОГО ШАБЛОНА**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации

(в технических системах)

05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

Автореферат диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва, 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном
учреждении высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)

Научный руководитель: **Зинченко Людмила Анатольевна**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры проектирования и технологии производства электронных средств МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Топорков Виктор Васильевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой вычислительной техники Московского энергетического института (национальный исследовательский университет)

Янакова Елена Сергеевна, доктор технических наук, старший научный сотрудник ОАО НПЦ «ЭЛВИС»

Ведущая организация: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва

Защита диссертации состоится «13» декабря 2016 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 в МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Госпитальный пер. д. 10, ауд. 613 м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.bmstu.ru МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба выслать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «_____» _____ 201_ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



Муратов И.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Современные сверхбольшие интегральные схемы (СБИС) и системы на кристалле (System-on-chip, SoC) состоят из миллиардов транзисторов. Проектирования таких устройств не представляется возможным без использования систем автоматизации проектирования (САПР), которые разрабатываются на основе специализированных алгоритмов. Вклад в развитие данной области знаний внесли ряд отечественных и зарубежных ученых: Б.В. Баталов, А.Л. Стемповский, В.А. Шахнов, Н. Шервани, И.П. Норенков, В.М. Курейчик, А. Канг и др. Литография в настоящее время является одной из основных технологических операций в общем процессе при производстве цифровых схем. Однако переход к проектным нормам глубокого субмикрона (130 нм и ниже) приводит к сильному влиянию эффекта оптической близости и, как следствие этого, к значительным искажениям при воспроизводстве топологических слоев СБИС. В документах the International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) выдвигаются следующие основные направления дальнейшего развития литографии: литография в жестком ультрафиолете; иммерсионная литография; методики двойного экспонирования, к которым относится технология двойного шаблона (ДШ). Технология ДШ является одним из перспективных направлений дальнейшего развития литографии. Этот подход, базирующийся на разделении критических слоев топологии СБИС на два шаблона для поочередного воспроизведения, позволяет существенно улучшить разрешение проекционной литографии. Основная идея технологии ДШ базируется на последовательном применении двух шаблонов во время экспонирования резиста для получения рисунка с размерами элементов, не достижимыми с помощью традиционных методов литографии. Для подготовки исходного топологического слоя СБИС к воспроизведению по технологии ДШ необходимо провести его декомпозицию на два новых. В связи с этим актуальна разработка специализированных алгоритмов и программной системы, которые позволят решить описанную выше проблему.

Состояние проблемы. Основной проблемой является разработка таких алгоритмов трансформации топологического слоя СБИС для технологии ДШ, которые позволят проводить его декомпозицию за минимальное время при

максимальном количестве разрешенных противоречий. В настоящее время файлы описания топологии достигают объема в десятки и даже сотни гигабайт. В критическом слое может находиться миллионы или миллиарды транзисторов. В настоящее время наибольшая производительность вычислений обеспечивается при использовании многопроцессорных вычислительных систем (МПВС). Эффективное использование вычислительных ресурсов МПВС требует разработки специальных параллельных алгоритмов.

Цель работы. Разработка и исследование параллельных алгоритмов трансформации топологического слоя субмикронных СБИС с произвольной геометрией для технологии двойного шаблона для высокопроизводительных вычислительных систем и их программная реализация.

Решаемые задачи. Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

1. Разработка и исследование параллельных алгоритмов трансформации топологического слоя субмикронных СБИС с манхэттенской и неманхэттенской геометрией для технологии ДШ для многопроцессорных вычислительных систем.
2. Разработка и исследование методов для визуализации и аналитической поддержки процесса трансформации топологического слоя СБИС для технологии двойного шаблона.
3. Реализация программного обеспечения (ПО) на основе разработанных алгоритмов для высокопроизводительных МПВС.
4. Проведение экспериментальных исследований разработанных алгоритмов и анализ полученных результатов.
5. Выбор метрик, определяющих качество работы алгоритмов трансформации топологического слоя субмикронных СБИС для технологии ДШ.

Методы исследования. Для достижения поставленных целей и задач в работе использованы: теория графов, теория алгоритмов, теория параллельных вычислений, вычислительная геометрия, когнитивная информатика.

Научная новизна работы. Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработаны оригинальные параллельные алгоритмы построения графа противоречий для топологии субмикронных СБИС с манхэттенской и неманхэттенской геометрией для многопроцессорных вычислительных систем.

2. Впервые разработан параллельный алгоритм трансформации топологического слоя субмикронных СБИС с произвольной геометрией для технологии ДШ на основе графа противоречий для МПВС.

3. На основе разработанных алгоритмов реализовано ПО «Parallel DPLayout Migrator», которое эффективно использует ресурсы МПВС.

4. Предложены когнитивные методы визуализации противоречий при трансформации топологического слоя СБИС для технологии ДШ.

5. Разработана классификация противоречий, возникающих при трансформации топологического слоя СБИС для технологии двойного шаблона.

6. Получены результаты экспериментальных исследований разработанных алгоритмов на реальных и тестовых топологических слоях субмикронных СБИС.

7. Обоснован выбор метрик, позволяющих сравнить эффективность разработанных алгоритмов.

Достоверность полученных научных результатов, выводов и рекомендаций диссертационной работы подтверждается корректным использованием методов теории графов, теории параллельных вычислений, положительными результатами применения разработанных алгоритмов, а также анализом результатов проведения экспериментальных исследований разработанных алгоритмов на тестовых топологиях субмикронных СБИС и при решении практически важных задач.

Личный вклад. Основные положения диссертации свидетельствуют о значительном личном вкладе соискателя в решение актуальных проблем, возникающих при параллельной трансформации топологического слоя СБИС для технологии двойного шаблона. В диссертации приведен результат фундаментального исследования текущего состояния предметной области. В рамках проводимого исследования были самостоятельно разработаны оригинальные параллельные алгоритмы трансформации топологии СБИС для технологии ДШ и

новое ПО «Parallel DPLayout Migrator». Было проведено экспериментальное исследование предложенных подходов и показана их практическая значимость.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Параллельный алгоритм построения графа противоречий для топологического слоя субмикронных СБИС с манхэттенской геометрией на основе модифицированного алгоритма сканирующей прямой.

2. Параллельный алгоритм построения графа противоречий для топологического слоя субмикронных СБИС с неманхэттенской геометрией на основе модифицированной структуры данных для «оконных» запросов.

3. Параллельный алгоритм трансформации топологического слоя субмикронных СБИС с произвольной геометрией для технологии двойного шаблона на основе нечеткого графа противоречий.

4. Метрики, позволяющие сравнить эффективность разработанных алгоритмов трансформации топологического слоя субмикронных СБИС с произвольной геометрией для технологии двойного шаблона.

5. Классификация противоречий при трансформации топологического слоя субмикронных СБИС с произвольной геометрией для технологии ДШ.

Практическая значимость и результаты внедрения. На базе предложенных в диссертации алгоритмов автором разработано ПО «Parallel DPLayout Migrator» для трансформации топологического слоя субмикронных СБИС для технологии ДШ. Была произведена трансформации топологических слоев ячеек библиотеки 45 nm NanGateOpenCellLibrary. Около 75% ячеек декомпозируется для технологии ДШ 90нм без увеличения площади ячеек и без модификации исходных полигонов. В результате применения предложенных подходов минимальное расстояние между полигонами в топологическом слое выросло в среднем в 1,35 раза для первого слоя относительно исходного, получаемого в результате декомпозиции критического слоя, и в 2,78 раза для второго слоя относительно исходного. Увеличение расстояния между полигонами может существенно повысить выход годных при производстве СБИС.

Предложенные в диссертации алгоритмы и разработанное ПО были использованы при выполнении научно-исследовательских работ в рамках: грантов

Президента РФ по поддержке ведущих научных школ Российской Федерации (НШ-1152.2012.9 и НШ-2903.2014.9), грантов РФФИ 12-07-31168 мол_а, 14-07-31074 мол_а, 15-07-03116 а, 15-29-01115 офи_м, 16-37-00254 мол_а (руководитель проекта). Результаты работы используются в учебном процессе МГТУ им. Н. Э. Баумана. По результатам работы присуждены: в 2013-2014 и 2014-2015 учебных годах стипендия Правительства Российской Федерации; в 2015-2016 учебном году стипендия Президента Российской Федерации.

Апробация работы. Основные теоретические и практические результаты работы были представлены на 7-ми международных [1, 3-5, 7, 8, 10] и 2-х всероссийских [2, 12] научно-технических конференциях. Так же результаты работы докладывались на научно-технических «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы», Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, в 2012-2013 [9, 11, 13] и семинарах лаборатории САПР микро- и наносистем, Москва, 2010–2013.

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 13 работах, из них: 5 работ в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ; 4 публикации в изданиях, индексируемых в базе «Scopus»; 3 публикации в изданиях, индексируемых в базе «Web of Science». Общий объем публикаций 1,99 печатных листов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и заключения, списка литературы. Общий объем диссертации 129 страниц, работа содержит 66 рисунков, 8 таблиц и список литературы из 106 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и определены задачи исследования, изложена структура диссертации.

В первой главе представлен аналитический обзор алгоритмов трансформации топологического слоя СБИС для технологии ДШ. Проведена классификация алгоритмов, которые применяются для решения задач автоматизации проектирования топологии субмикронных СБИС. Обсуждаются основные подходы, проблемы и задачи автоматизации проектирования СБИС и систем на кристалле. Рассмотрены различные подходы к обработке топологии СБИС на

высокопроизводительных МПВС. Проведен анализ перспектив применения неманхэттенской геометрии в современных СБИС.

Во второй главе рассматриваются параллельные алгоритмы построения графа противоречий (ГП), который является основой для трансформации топологического слоя субмикронных СБИС для технологии ДШ, как для манхэттенской, так и для неманхэттенской геометрии. Для решения задачи построения графа противоречий применяются методы вычислительной геометрии.

В работе предлагается следующая постановка задачи построения графовой модели представления топологии СБИС для трансформации для технологии ДШ:

$$d(Po_{li}, Po_{lj}) \geq d_{dr}(Po_{li}, Po_{lj}), \quad (1)$$

$$d(Po_{li}, Po_{lj}) \geq d_{dp}(Po_{li}, Po_{lj}), \quad (2)$$

где $d(Po_{li}, Po_{lj})$ – расстояние между полигонами; $d_{dr}(Po_{li}, Po_{lj})$ – минимально допустимые расстояния между Po_{li} и Po_{lj} , лежащими в одном слое, согласно конструкторско-технологическим ограничениям; $d_{dp}(Po_{li}, Po_{lj})$ – минимально допустимое расстояние между полигонами Po_{li} и Po_{lj} , лежащими в одном слое, допускающее качественное воспроизведение этих геометрических объектов в одном слое, в частном случае равное критическому параметру технологии ДШ; $i = 1, \dots, P_l$, $j = i + 1, \dots, P_l$, $l = 1, \dots, L$; L – количество топологических слоев СБИС; P_l – количество полигонов в l -ом топологическом слое.

Для решения задачи декомпозиции топологического слоя на два новых для трансформации топологического слоя СБИС для технологии ДШ используется модель на основе нечеткого ГП: $\sim Gc = \{V, \sim E\}$, где $\sim Gc$ – нечеткий ГП; $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ – множество вершин ГП, каждая вершина соответствует определенному полигону; $|V| = n$ – количество вершин ГП (равно количеству полигонов); $E = \{e_1, \dots, e_m\}$ – множество ребер ГП, характеризуемое функцией $\mu_E(x)$ как зависимость от расстояния x ; $|E| = m$ – число ребер в ГП. Если расстояние x между двумя полигонами Po_{li} и Po_{lj} меньше, чем параметр технологии ДШ, то соответствующее ребро и его вес, определяемый функцией $\mu_E(x)$, добавляется в ГП.

На Рис. 1 показано распределение задач между процессорами и поиск противоречий для топологического слоя СБИС с манхэттенской и неманхэттенской

геометрией. Предложенная в диссертационной работе структура данных для представления манхэттенской топологии СБИС удобна тем, что исходный топологический слой разделен на горизонтальные полосы, которые можно обрабатывать на отдельных процессорах. Для учета взаимного влияния близко расположенных полигонов разделение на горизонтальные полосы выполняется так, чтобы обеспечить перекрытие разделяемых участков топологии СБИС.

Принцип работы предложенного в работе алгоритма построения графа противоречий для манхэттенской топологии на основе модифицированного алгоритма заметающей прямой заключается в следующем. Цифры 1-7 (Рис. 1) показывают положения заметающей прямой. В каждом положении заметающей прямой происходит добавление, удаление отрезков, а также проверка расстояния между ними. В положении 1 в упорядоченное множество отрезков ST последовательно добавляются отрезки А, В, С и D. После добавления отрезка в ST производится проверка расстояния до соседних отрезков в статусе: отрезки в ST поддерживаются в порядке возрастания их координаты по оси ординат. Проверка расстояния между отрезками А и В, С и D не производится, т.к. они относятся к одному и тому же полигону. После добавления отрезка С происходит проверка расстояния между В и С. В результате этой проверки находится противоречие: расстояние между В и С меньше заданного параметра технологии двойного шаблона. В результате в граф противоречий добавляется ребро между вершинами, которые соответствуют полигонам 1 и 2.

Структура данных для поиска противоречий в топологическом слое СБИС с неманхэттенской геометрией так же основана на разделении исходного топологического слоя на горизонтальные полосы, которые можно обрабатывать на отдельных процессорах. Основное отличие от структуры данных для манхэттенской геометрии является то, что разделение отрезков по полосам некорректно делать на основании их количества, так как один и тот же отрезок может пересекать всю топологию от верхней до нижней границы ячейки. На Рис. 1 представлен пример использования оконного запроса для поиска противоречия в критическом слое топологии с О- и F-транзисторами. Размер прямоугольного окна $R(S_i)$ определяется текущим значением параметра технологии двойного шаблона α . Для всех отрезков,

попавших в окно, производится проверка: $d(S_i, S_k) < \alpha$, где d – расстояние между отрезками, S_k – отрезок, попавший в окно $R(S_i)$. Если проверка выполняется, то добавляется новое ребро в ГП для полигонов, которым соответствуют отрезки.

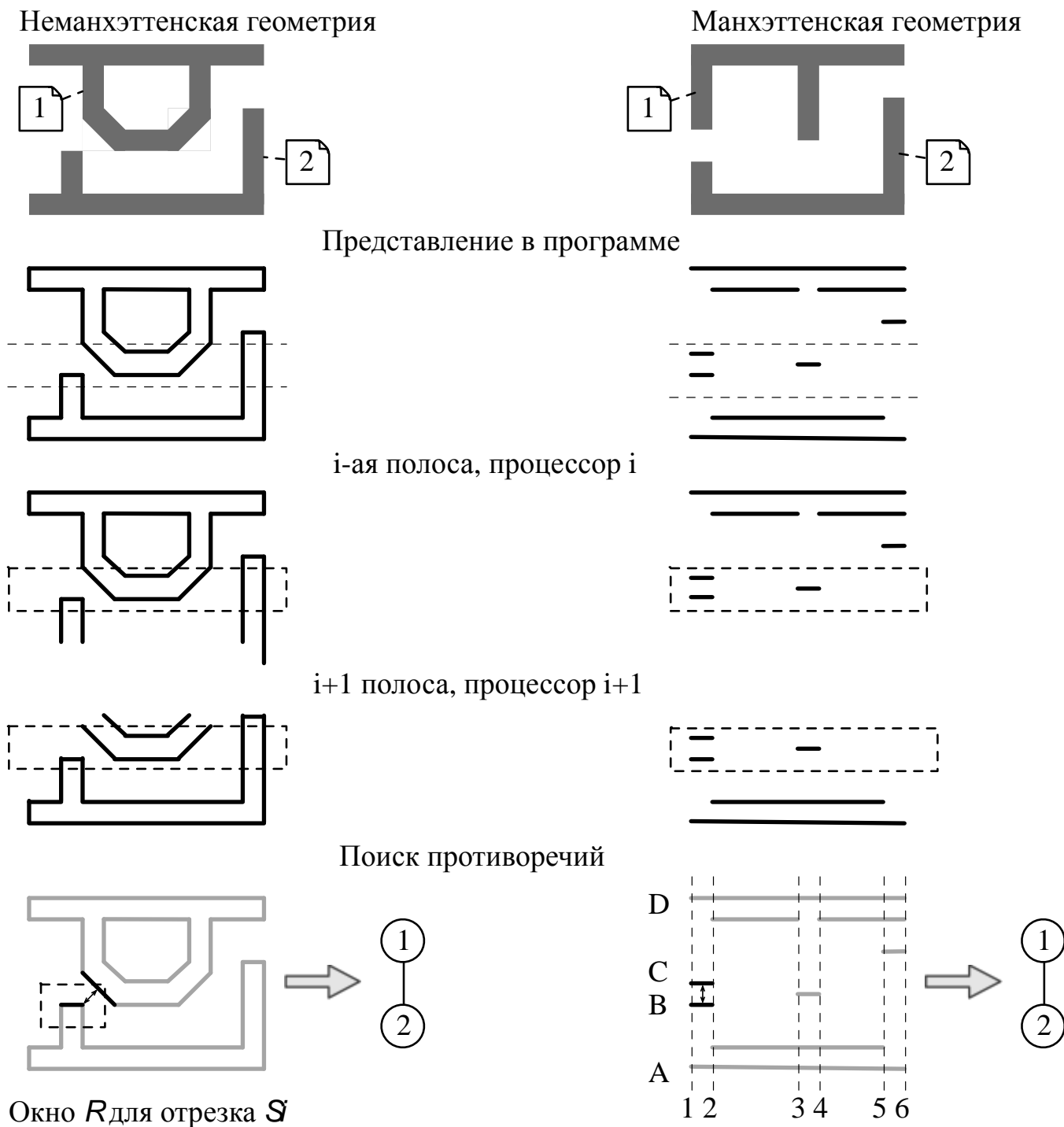


Рис. 1. Построение графа противоречий для топологического слоя СБИС

В третьей главе рассматриваются разработанный параллельный алгоритм трансформации топологического слоя субмикронных СБИС для технологии ДШ на основе ГП. Разработанный параллельный алгоритм трансформации субмикронных

СБИС для технологии двойного шаблона основан на модифицированном алгоритме проверки графа на двудольность. Так же в диссертационной работе предлагаются методы визуализации и аналитической поддержки процесса проектирования СБИС для технологии ДШ, в их числе методы кластеризации противоречий, возникающих в процессе трансформации топологического слоя СБИС для технологии ДШ.

Предложенный в работе алгоритм поиска решения для декомпозиции топологического слоя СБИС для технологии ДШ заключается в следующем. На вход алгоритма поступают: топологический слой La_l , который представлен в виде множества полигонов; максимальное и минимальное значение параметра декомпозиции топологии для технологии ДШ α_{min} и α_{max} ; шаг изменения параметра декомпозиции $step$. На первом шаге алгоритма текущему значению параметра декомпозиции α присваивается максимальное значение α_{max} . На следующем шаге алгоритма выполняется построение ГП.

Алгоритм для построения ГП для топологического слоя La_l выбирается на основании геометрии: если топологический слой имеет только манхэттенскую геометрию, то используется параллельный алгоритм построения ГП на основе модифицированного алгоритма сканирующей прямой; в случае неманхэттенской геометрии (например, Y- и X-геометрия) применяется параллельный алгоритм построения ГП на основании структуры данных для «оконных» запросов.

Далее производится проверка построенного ГП на двухцветность. Если ГП двухцветный, то решение найдено и результатом работы алгоритма является ГП, раскрашенный в два цвета. Если граф не двухцветный, то значение параметра α уменьшается на шаг $step$. Процесс поиска решения повторяется до тех пор, пока не будет найдено решение или значение параметра α не станет меньше минимального значения. В таком случае результатом работы алгоритма будет нечеткий цикл в ГП.

Следует заметить, что после трансформации топологический слой СБИС теряет связь с исходной иерархией ячеек. Данный факт приводит к тому, что инженеру тяжело анализировать полученные результаты. Для решения указанной проблемы в диссертационной работе предлагается использовать специальную модель, которая упрощает локализацию противоречий. При классификации противоречий вершины ГП, распределяются между кластерами согласно исходной

иерархии ячеек. Кластеры геометрически представляются в виде прямоугольников. Необходимо отметить, что каждая ячейка может встречаться несколько раз в одной и той же топологии.

Большие кластеры представляют собой ячейки, меньшие кластеры – конкретные экземпляры ячеек. Предлагаемая модель одновременно показывает и геометрические примитивы, из которых состоит топология, и иерархию ячеек.

В работе предлагается следующая классификация противоречий между полигонами: внутренние противоречия – противоречия между полигонами в рамках одного экземпляра ячейки; противоречия ячейки – противоречия между полигонами из разных экземпляров одной и той же ячейки; внешние противоречия – противоречия между полигонами, которые относятся к разным ячейкам. Для визуализации предложенной выше классификации противоречий возможно использование цветовой кодировки для представления ребер ГП: ребра, представляющие противоречия первого типа отображать черным цветом, второго типа – синим цветом, а третьего – красным цветом как наиболее сложные противоречия.

Предложенная классификация противоречий и использование когнитивной графики для представления информации о противоречиях позволяет управлять данными при проектировании СБИС по технологии двойного шаблона. Очевидно, что инженер-проектировщик может выбирать разные проектные решения для разных типов противоречий. Противоречия первого типа можно устранить, изменив топологию одной ячейки. Противоречия второго типа разрешаются выбором другой ячейки или изменением размещения ячеек на кристалле. Последний тип противоречий наиболее сложен, так как необходимо проанализировать множество альтернативных проектных решений. Для визуализации наиболее проблемных участков топологии в диссертационной работе предлагается увеличивать размер вершины графа противоречий, которая представляет полигон критического слоя топологии СБИС. Увеличивать размер вершины проще, если вершина графа визуализируется как овал или круг, так как в том случае можно увеличивать радиус. Радиус вершины в диссертационной работе предлагается рассчитывать по формуле: $r_i = r_0 + \sum_{j=1}^{j=3} w_j \times r_0 \times e_{ij}$, где r_i – радиус i -ой вершины ГП; r_0 – радиус вершины ГП, у которой нет инцидентных ребер; w_j – весовой коэффициент противоречий j -

ого типа предложенной классификации; e_{ij} – количество противоречий j -ого типа для i -ой вершины ГП. В диссертационной работе предлагается использовать следующие значения весовых коэффициентов: 0,1 для внутренних противоречий; 0,15 для противоречий ячейки; 0,25 для внешних противоречий.

В четвертой главе приводится описание ПО, которое разработано на основе алгоритмов, предложенных в главах 2 и 3. В главе обсуждаются предложенные метрики, по которым можно оценить качество декомпозиции топологии субмикронных СБИС для технологии двойного шаблона. В главе представлены результаты экспериментального исследования разработанных алгоритмов на тестовых топологиях СБИС и для решения практических важных задач.

Полученные экспериментальные результаты доказали, что вычислительный сложность разработанного алгоритма не более $O(n \log n)$, что является приемлемым результатом. Следует отдельно заметить, что обработка неманхэттенской геометрии занимает несколько больше времени, чем обработка манхэттенской. Данный факт можно объяснить тем, что алгоритм обработки неманхэттенской геометрии значительно сложнее. Максимальное ускорение от использования возможностей МПВС не превышает 2 раза. Наибольшее ускорение наблюдается при переходе от обработки на одном процессоре к обработке на двух. При увеличении числа нитей выполнения при сохранении количества процессоров темпы ускорения работы программы уменьшаются.

В Таблице 1 приведены результаты экспериментального исследования предложенных подходов для свободно распространяемой библиотеки 45nm Nangate Open Cell Library. На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что порядка 82% ячеек было декомпозировано для технологии ДШ, включая ячейки с произвольной геометрией.

Следует отметить, что лучше всего удавалось декомпозировать слои поликремния, первый и второй слой металлизации. В третьем слое металлизации получилось декомпозировать только 55% ячеек. Так же следует заметить, что 80% конфликтов было устранено. Наибольшее количество конфликтов наблюдается в третьем слое металлизации. Процент их разрешения порядка 33%.

Результаты декомпозиции ячеек библиотеки 45nm Nangate Open Cell Library

	Поликремний	Металл 1	Металл 2	Металл 3	Итого
Кол-во ячеек, шт	62	127	163	164	516
Кол-во ячеек декомпозировано, шт	62	107	163	91	423
Кол-во полигонов, шт.	312	916	5137	1339	7704
Кол-во конфликтов, шт.	245	446	2455	1261	4407
Кол-во конфликтов разрешено, шт.	245	446	2455	420	3566

Для дальнейшего разрешения конфликтов инженер-проектировщик СБИС может использовать средства аналитической поддержки, предложенные в главе 3. Возможности предложенного подхода для визуализации продемонстрированы на примере трансформации топологического слоя ячейки «Сумматор» (Рис. 2).

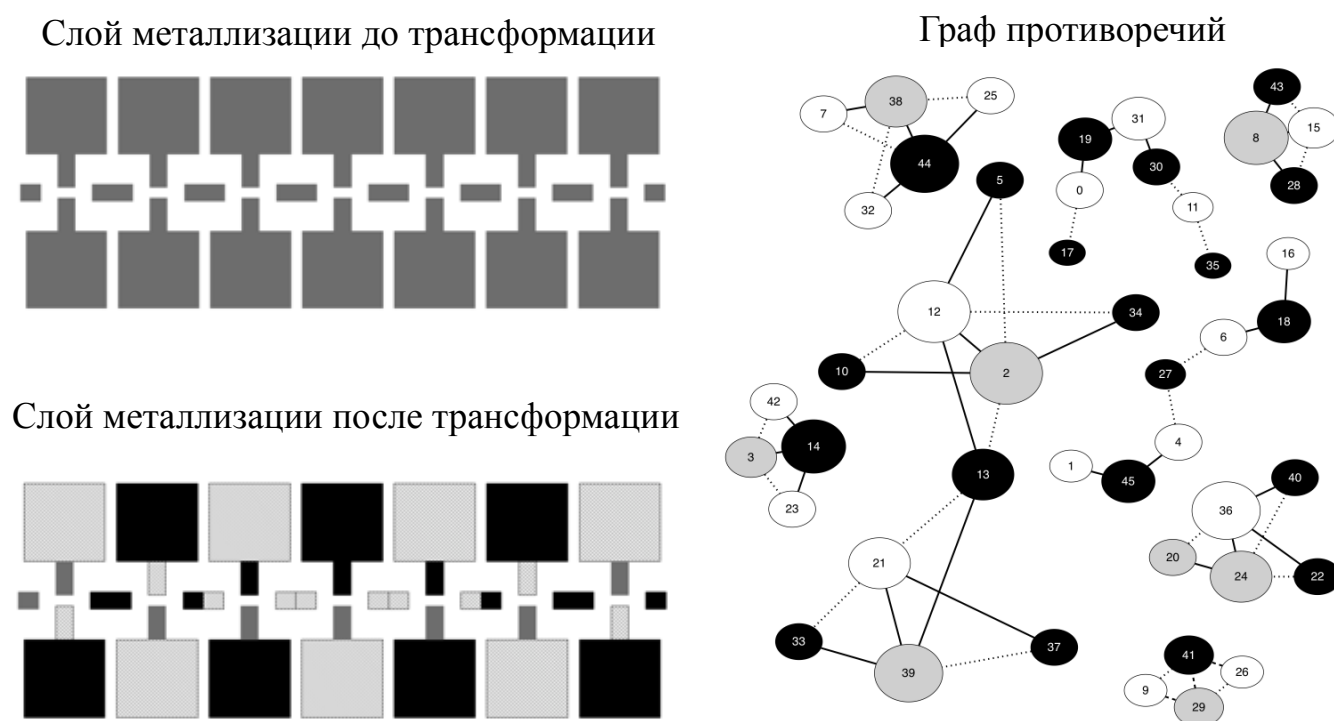


Рис. 2. Трансформация слоя металлизации ячейки сумматора

ГП для фрагмента топологии ячейки сумматора, который не получилось декомпозировать для технологии ДШ, приведен на Рис. 2. ГП содержит 46 вершин и 57 ребер. Первый слой после декомпозиции показан белым, второй слой – черным. Противоречия первого типа даны пунктирными линиями, противоречия второго типа даны штриховыми линиями, а противоречия третьего типа даны черным. Вершины, которые не получилось окрасить и, как следствие, разнести по слоям, показаны серым цветом. На основании Рис. 2 достаточно тяжело определить, какие ячейки исходной топологии привели к неразрешимым противоречиям. В диссертации предложены методы когнитивной поддержки процесса проектирования цифровых схем.

В общих выводах и заключении представлены основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В результате проведенного аналитического обзора литературных источников было установлено, что на данный момент нет разработанных параллельных алгоритмов трансформации топологического слоя СБИС для технологии двойного шаблона с неманхэттенской геометрией. Однако неманхэттенская геометрия (Y- и X-геометрия) в настоящее время широко используется при применении многозатворных трехмерных транзисторов в современных СБИС и системах на кристалле.

2. Предложен и разработан параллельный алгоритм построения графа противоречий для топологического слоя СБИС с манхэттенской геометрией на основе модифицированного алгоритма сканирующей прямой.

3. Предложен и разработан параллельный алгоритм построения графа противоречий для топологического слоя СБИС с неманхэттенской геометрией на основе модифицированной структуры данных для «оконных» запросов.

4. Предложен и разработан параллельный алгоритм трансформации топологического слоя субмикронных СБИС с произвольной геометрией для технологии двойного шаблона на основе нечеткого графа противоречий.

5. Проведена классификация противоречий, которые наблюдаются при декомпозиции топологического слоя субмикронных СБИС с произвольной геометрией для технологии двойного шаблона. Выделены три основных типа противоречий: внутренние, противоречия ячейки и внешние противоречия.

6. На основе предложенных алгоритмов реализована программная система «Parallel DPLayout Migrator». Входными данными являются файл описания топологии в формате GDSII и параметры декомпозиции топологических слоев. Результатом работы системы является файл в формате GDSII с новыми топологическими слоями после трансформации и файлы описания графа противоречий в формате DOT.

7. Проведены экспериментальные исследования предложенных алгоритмов. Полученные результаты показали, что временная сложность разработанных алгоритмов не превышает $O(n \log n)$. Показано снижение времени трансформации топологического слоя СБИС для технологии двойного шаблона при использовании вычислительных ресурсов многопроцессорных вычислительных систем, при этом максимальное ускорение не превышает двух раз.

8. Предложенные оригинальные параллельные алгоритмы трансформации топологического слоя цифровой схемы при наличии ограничений технологии двойного шаблона позволяют увеличить минимальное расстояние между произвольной парой полигонов в топологическом слое в среднем в 1,35 раза для первого нового слоя относительно исходного критического слоя, который получается в результате декомпозиции критического слоя, и в 2,78 раза для второго слоя относительно исходного. Это может положительно сказаться на проценте выхода годных при производстве СБИС.

9. Показано, что наиболее информативной метрикой для определения эффективности работы разработанных алгоритмов является относительное минимальное расстояние между полигонами.

10. Предложенные алгоритмы апробированы для трансформации библиотеки ячеек 45 нм Nangate Open Cell Library. Было трансформировано порядка 75% ячеек и устранено более 60% конфликтов.

Основные результаты работы отражены в работах:

1. Shakhnov V., Zinchenko L., Verstov V. Topological transformation of submicron VLSIs for the double lithographic mask technology // *Russian Microelectronics*. Volume 42, Issue 6. 2013. P. 347-359. (SCOPUS 2-s2.0-84888082987) (1,2 п.л. / 0,4 п.л.)

2. Шахнов В.А., Зинченко Л.А., Верстов В.А. Параллельный алгоритм трансформации топологического слоя топологии субмикронных СБИС с произвольной геометрией для технологии двойного шаблона. Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем 2014 // *Сборник трудов / Под общей редакцией академика РАН А.Л. Стемпковского*. М.:ИППИМ РАН, 2014. Ч. I. С. 137-142. (0,4 п.л. / 0,13 п.л.)

3. Zinchenko L., Makarchuk V., Verstov V. SOI Layout Decomposition for Double Patterning Lithography on High-Performance Computer Platforms // *Proceedings SPIE 9440: International Conference on Micro- and Nanoelectronics*. Zvenigorod, 2014. P.101-107. (SCOPUS 2-s2.0-84923108404, Web of Science WOS:000348033400032) (0,2 п.л. / 0,07 п.л.)

4. Shakhnov V., Zinchenko L., Verstov V. Parallel Algorithm of SOI Layout Decomposition for Double Patterning Lithography on High-Performance Computer Platforms // *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, №423, 2014. P. 543-550. (SCOPUS 2-s2.0-84923103519, Web of Science WOS:000341133400060) (0,2 п.л. / 0,07 п.л.)

5. Heterogeneous Knowledge Representation for VLSI Systems and MEMS Design / V. Verstov [et al.] // *Cognitive Infocommunications (CogInfoCom)*, 2013 IEEE 4th International Conference, Budapest (Hungary), 2013. P. 189-194. (SCOPUS 2-s2.0-84894127462, Web of Science WOS:000349770000032) (0,4 п.л. / 0,13 п.л.)

6. Верстов В.А. Высокопроизводительный алгоритм восстановления графовых моделей представления топологии СБИС для технологии двойного шаблона // *Молодежный научно-технический вестник*. – Москва.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, №10, 2012. С. 46. (0,2 п.л.)

7. Visual Analytics Support for the SOI VLSI Layout Design for Multiple Patterning Technology / V. Verstov [et al.] // *Cognitive Infocommunications*

(CogInfoCom), 2015 IEEE 6th International Conference. Gyor (Hungary), 2015. P. 67-70.

(0,4 п.л. / 0,13 п.л.)

8. Зинченко Л.А., Гладких А.А., Верстов В.А. Исследование высокопроизводительных алгоритмов трансформации топологии СБИС для технологии двойного шаблона // Труды VI Международного форума «IT Forum 2020/Взгляд в будущее», Н. Новгород, 2013. С.17-20. (0,1 п.л. / 0,03 п.л.)

9. Верстов В.А. Параллельный стохастический алгоритм декомпозиции топологии СБИС для технологии двойного шаблона с повышением выхода годных // Сборник трудов XV научно-технической конференции «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2013». - Москва.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. С. 402-406 (0,2 п.л.)

10. Шахнов В.А., Зинченко Л.А., Верстов В.А. Трансформация топологии СБИС для технологии двойного шаблона на параллельных вычислительных системах // Сборник трудов конференции «Облачные вычисления. Образование. Исследования. Разработка», Москва, РАН, 2012. С. 21-22. (0,1 п.л. / 0,03 п.л.)

11. Верстов В.А. Высокопроизводительный алгоритм перехода к графовым моделям представления топологии СБИС для технологии двойного шаблона // Сборник трудов XIV научно-технической конференции «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2012». Москва.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. С. 209-213 (0,2 п.л.)

12. Верстов В.А. Разработка высокопроизводительных алгоритмов трансформации топологии СБИС для технологии двойного шаблона // Сборник трудов четвертой всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Наноинженерия», Москва.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. С.15-22. (0,2 п.л.)

13. Верстов В.А. Особенности обработки входной топологической информации в САПР СБИС для различных архитектур вычислительных систем // Сборник трудов XIII научно-технической конференции «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2011». - Москва.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. С.28-33. (0,2 п.л.)