

Оптимизация трассировки ячейки БИС в условиях неопределенности

П. М. Ширяев

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)
pshir2000z@gmail.com

С. Э. Миронов

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)
semironovspb@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена рассмотрению вопросов оптимизации этапа глобальной трассировки в процессе проектирования топологии микроэлектронных устройств. Рассмотрены критерии оценки результата трассировки. Исследованы и разработаны методы и средства оптимизации разных уровней. Представлены результаты работы созданной авторами системы трассировки.

Ключевые слова: алгоритм трассировки; топология; глобальная трассировка; плотноупакованное проектирование топологии интегральных схем

I. ВВЕДЕНИЕ

Современная микроэлектроника характеризуется экспоненциальным ростом сложности проектов, обусловленным непрерывным увеличением степени интеграции и миниатюризацией технологических норм. В этих условиях ключевое значение приобретают методы автоматизированного проектирования, обеспечивающие корректное функционирование будущих изделий при соблюдении жестких производственных ограничений. Одним из наиболее критичных этапов проектирования БИС является трассировка, от качества выполнения которой напрямую зависят такие параметры, как быстродействие, энергопотребление и надежность микросхемы.

Процесс трассировки традиционно разделяют на два взаимосвязанных этапа: глобальную и детальную трассировку. Глобальная трассировка, являющаяся NP-полной задачей, заключается в определении оптимальных путей соединения элементов с учетом топологических ограничений. Детальная трассировка, в свою очередь, обеспечивает физическую реализацию этих соединений в строгом соответствии с заданными проектными нормами, включая требования к ширине проводников, межсоединениям и переходным контактам.

В работе рассматриваются актуальные критерии оценки качества трассировки, а также методы ее оптимизации в условиях технологической и топологической неопределенности. Особое внимание уделяется вопросам обеспечения корректности трассировки при переходе между различными слоями металлизации, что является критичным для современных многослойных структур БИС.

II. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ТРАССИРОВКИ

Качество трассировки определяется совокупностью количественных и качественных показателей, среди

которых можно выделить следующие ключевые критерии:

Общая длина проводников – минимизация данного параметра позволяет снизить паразитные емкости и сопротивления, что положительно сказывается на быстродействии и энергопотреблении схемы.

Количество скоплений шин – высокая плотность межсоединений на отдельных участках может привести к нарушению проектных норм и необходимости повторной трассировки.

Максимальная длина критических проводников – чрезмерная длина отдельных соединений может стать причиной задержек сигналов и нарушения временных характеристик схемы.

Занимаемая площадь – эффективное использование кристалла напрямую влияет на себестоимость производства.

При этом выполнение трассировки должно удовлетворять ряду обязательных условий:

Полное завершение трассировки – отсутствие нереализованных соединений является базовым требованием.

Соответствие технологическим нормам – соблюдение минимальных расстояний между проводниками, допустимых углов изгиба и других производственных ограничений.

Функциональная эквивалентность результата исходной электрической схеме – трассировка не должна вносить изменений в логику работы проектируемого устройства.

Особую сложность представляет обеспечение корректности переходов между активными областями кремния и слоями металлизации. Данный процесс требует строгого учета параметров переходных контактов, которые могут становиться "узкими местами" с точки зрения надежности и производительности схемы. В условиях технологической неопределенности (вариации параметров производства) задача оптимизации трассировки приобретает дополнительную сложность, что требует разработки специализированных алгоритмов, устойчивых к подобным отклонениям.

III. МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАССИРОВКИ

А. Оптимизации по типу алгоритмов

При проектировании БИС ключевым вызовом является эффективное соединение элементов в условиях жестких технологических ограничений и растущей сложности топологий. Современные алгоритмы трассировки принципиально различаются по своим подходам к решению этой задачи: от точных, но ресурсоемких методов до быстрых эвристик. Рассмотрим три фундаментальных класса алгоритмов, составляющих основу большинства промышленных инструментов трассировки.

Алгоритмы маршрутизации в лабиринте применяются для поиска пути между двумя точками (источником и целью) на прямоугольной сетке, моделирующей область трассировки. Свободные участки представляются незаблокированными вершинами, а препятствия – заблокированными. Процесс состоит из двух фаз: исследования (волновое расширение от источника до достижения цели) и восстановления пути (обратный проход по меткам вершин). Их основной недостаток – требования к памяти, так как информация хранится для каждого узла сетки.

Алгоритмы line-probe (к ним относятся алгоритмы Миками-Табути, Хайтауэра) используют отрезки вместо узлов сетки, что сокращает объем памяти до $O(L)$, где L – число отрезков. Исходные отрезки строятся от источника и цели, а новые генерации создаются из точек «побега» на существующих линиях до их пересечения. В отличие от маршрутизации в лабиринте, эти алгоритмы менее требовательны к ресурсам, однако метод Миками гарантирует лишь нахождение произвольного пути, а алгоритм Хайтауэра может не найти существующее соединение даже при его наличии.

В отдельный тип алгоритмов можно выделить алгоритмы на основе деревьев Штейнера. Для многоточечных соединений наиболее часто применяются прямоугольные деревья Штейнера (RST), минимизирующие суммарную длину ребер. Задача построения RST относится к классу NP-трудных, что обуславливает использование эвристических подходов, часто основанных на минимальных покрывающих деревьях. Вычислительная сложность этих алгоритмов существенно выше по сравнению с маршрутизацией в лабиринте и line-probe из-за необходимости перебора множества вариантов соединения терминалов.

Таким образом, выбор конкретного алгоритма трассировки определяется спецификой решаемой задачи. Маршрутизация в лабиринте обеспечивает высокую надежность нахождения пути, но требует чуть более высоких затрат памяти, что в некоторых случаях может являться ограничением при применении для крупных проектов. Алгоритмы line-probe представляют компромисс между эффективностью использования памяти и качеством решения, но не всегда гарантируют оптимальности результата. Методы на основе деревьев Штейнера дают более качественный результат при работе с многотерминальными сетями, однако их использование оправдано лишь в случаях, когда вычислительные

затраты допустимы в обмен на минимизацию суммарной длины соединений.

В. Оптимизация с использованием шаблонов

Метод трассировки с использованием шаблонов основан на применении предопределенных конфигураций для соединения двухтерминальных сетей. В отличие от классических алгоритмов поиска пути, данный подход использует ограниченный набор маршрутов, таких как L-образные (рис. 1а) или Z-образные (рис. 1б) паттерны, размещаемые в пределах ограничивающего прямоугольника.

Ключевое преимущество шаблонной трассировки заключается в существенном сокращении вычислительных затрат. В отличие от маршрутизации в лабиринте, требующего анализа всех возможных путей, данный метод рассматривает лишь фиксированное число вариантов в пределах граничной области. Например, для L-образного паттерна анализируются только пути по периметру ограничивающего прямоугольника, что обеспечивает предсказуемую временную сложность $O(1)$. Шаблонный подход требует проверки значительно меньшего числа вариантов по сравнению с волновыми алгоритмами.

Однако сокращение вычислительной сложности достигается ценой потенциального ухудшения качества решения. В худшем случае выбор между верхним и нижним L-образным маршрутом может дать субоптимальный результат, если оба варианта оказываются неэффективными. Тем не менее, данные показывают [4], что такие ситуации встречаются достаточно редко.

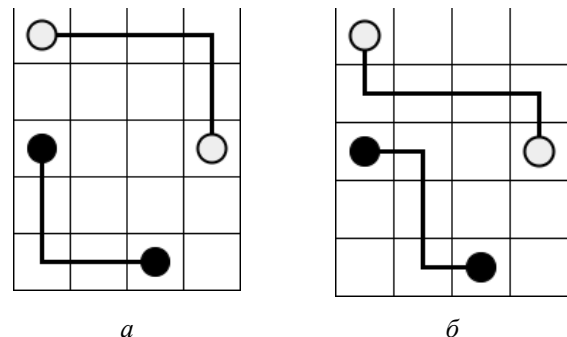


Рис. 1. Использование шаблонов: а) L образный, б) Z образный

С. Оптимизации организации слоев

Ключевым аспектом повышения эффективности трассировки в многослойных структурах БИС является стратегическое чередование направлений проводников на различных металлических слоях. Наиболее распространенные подходы включают использование трехслойных моделей HV (Горизонтальный-Вертикальный) на рис. 2а, HVH (Горизонтальный-Вертикальный-Горизонтальный) на рис. 2б и VHV (Вертикальный-Горизонтальный-Вертикальный) на рис. 2г, где каждый слой резервируется для проводников строго определенной ориентации.

Системы с резервированием слоев и трассировкой на фиксированной сетке демонстрируют значительно более высокое быстродействие по сравнению с системами без

закрепления направлений за слоями (рис. 2, б). Это объясняется существенным сокращением пространства поиска возможных маршрутов и упрощением алгоритмов принятия решений.

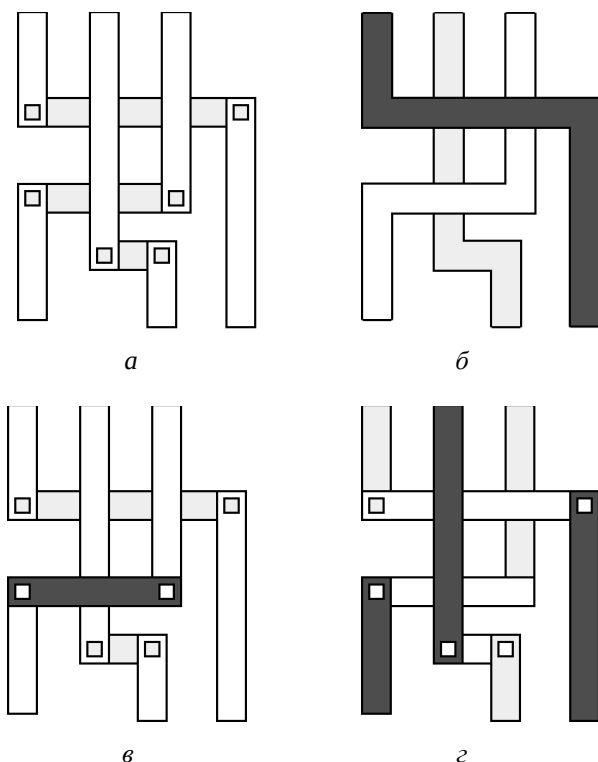


Рис. 2. Различные способы резервирования слоев: а) NV модель, б) без резервирования, в) NVH модель, г) VHV модель

Помимо непосредственного ограничения, может применяться также комбинированный подход, реализованный в [3]. Первоначальная трассировка выполняется на условной сетке, после чего полученный путь подвергается послойной оптимизации. Технология включает разбиение маршрута на элементарные сегменты с последующим их распределением по слоям в соответствии с заданной стратегией чередования направлений (рис. 3). Такой метод позволяет сохранить преимущества регулярных структур, одновременно обеспечивая гибкость при адаптации к конкретным топологическим условиям.

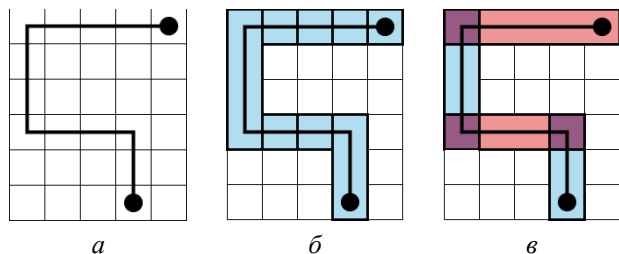


Рис. 3. Разделение пути на слои с перпендикулярными направлениями: а) исходный путь, б) разделение пути на вертикальные зоны, в) построение горизонтальных зон

Правильная организация слоев приобретает особую важность в условиях технологической неопределенности, когда жесткое закрепление направлений за слоями позволяет минимизировать вариации параметров

межсоединений и повысить предсказуемость электрических характеристик проектируемой схемы.

D. Оптимизация порядка трассировки

Качество и эффективность трассировки в значительной степени определяются порядком, в котором строятся отдельные проводники. Последовательная трассировка соединений в произвольном порядке часто приводит к субоптимальным результатам, выражающимся в увеличении общей длины проводников, возникновении избыточных перекрестков и ухудшении параметров разводки. Наглядной иллюстрацией этого изображена на рис. 4. При различной последовательности трассировки двух соединений получаются существенно отличающиеся результаты: на рис. 4а общая длина проводников составляет 16 условных единиц (6+10), тогда как при оптимальном порядке построения (рис. 4б) – всего 12 единиц (6+6).

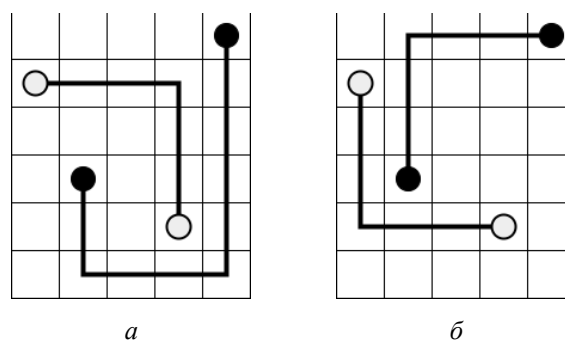


Рис. 4. Различия длин путей при изменении порядка трассировки: а) субоптимальный порядок, б) оптимальный порядок

Для решения данной проблемы применяются методы одновременной (параллельной) трассировки, когда пути для всех соединений строятся итеративно, по одному шагу для каждой пары проводников одновременно. Такой подход позволяет:

- учитывать взаимное влияние трассируемых соединений на каждом этапе;
- оптимально распределять доступное пространство между всеми проводниками;
- минимизировать общую длину соединений и площадь разводки;
- избегать ситуаций, когда ранние соединения блокируют оптимальные пути для последующих.

Оптимизация порядка трассировки приобретает большую ценность в условиях неопределенности технологических параметров, когда требуется обеспечить устойчивость решения к возможным вариациям.

IV. СИСТЕМА ТРАССИРОВКИ CELLTRACE

Применение рассмотренных методов оптимизации позволило разработать прототип системы трассировки ячеек БИС «CellTrace».

Данная система использует алгоритм маршрутизации в лабиринте на трехмерной сетке с оптимизацией порядка трассировки и возможностью работы с ориентированными слоями. Порядок трассировки определяется количеством соединяемых точек, чем

больше точек, тем раньше будет выполнена трассировка для конкретного потенциала.

Количество слоев металла может быть задано пользователем, при этом порядок слоя определяет его приоритет. Чем ближе к кремнию расположен слой металла, тем более приоритетным он является для трассировки.

На рис. 5 представлен результат трассировки виртуальной ячейки мультиплексора, полученной в результате работы алгоритма [6] с использованием двух слоев металла. Результат трассировки отображает послойно для более удобного визуального восприятия.

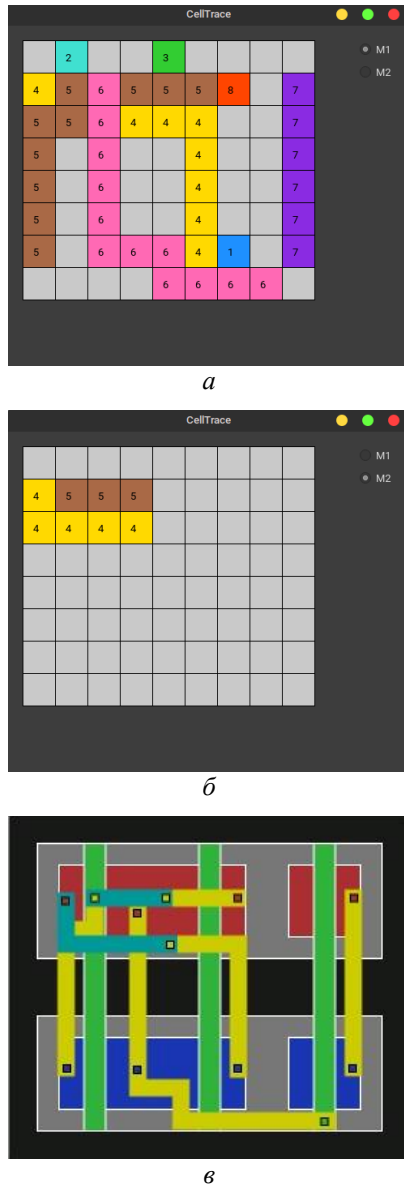


Рис. 5. Результат трассировки схемы мультиплексора: а) трассировка на слое M1, б) трассировка на слое M2, в) получившаяся виртуальная топология ячеек

Числа на клетках сетки обозначают номер потенциала в электрической схеме: 1 – VCC, 2 – MUX_IN, 3 – NOT_MUX_IN, 4 – A_IN, 5 – B_IN, 6 – внутреннее соединение, 7 – MUX_OUT, 8 – GND.

Кроме перечисленных особенностей, система также имеет возможность работы с частично готовой трассировкой, что предоставляет возможности гибкого использования.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования были получены следующие результаты:

Во-первых, рассмотрены ключевые критерии оценки качества трассировки, включающие общую длину проводников, количество скоплений шин, максимальную длину соединений и занимаемую площадь.

Во-вторых, рассмотрены и систематизированы основные методы оптимизации трассировки, использующие различные особенности этого процесса:

- алгоритмы поиска пути;
- подходы с использованием шаблонов;
- методы организации слоев;
- оптимизация порядка трассировки соединений.

В-третьих, разработана система трассировки, реализующая несколько из рассмотренных методов оптимизации. Система предоставляет возможность быстрой корректировки результата, что особенно ценно при сборке топологии макроблока БИС, когда требуется оперативно модифицировать отдельные ячейки.

Полученные результаты создают основу для дальнейшего совершенствования методов автоматизированной трассировки в условиях технологической неопределенности современного производства БИС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Sherwani Naveed A. Algorithms for VLSI physical design automation 3. Print. Boston etc.: Kluwer Academic Publishers, 2002. 488 p., ISBN 0-7923-9294-9
- [2] Mamedov G.A., Mironov S.E., Tikhonova A.I., Application of Graph Isomorphism Analysis Algorithms for Scheme-Topological Verification of Complex Microelectronic Objects // 2024 XXVII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), Saint Petersburg, Russian Federation, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/SCM62608.2024.10554089.
- [3] Kahng A.B., Wang L., Xu B., TritonRoute: The Open-Source Detailed Router // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, vol. 40, no. 3, pp. 547-559, March 2021, doi: 10.1109/TCAD.2020.3003234.
- [4] Kastner R., Bozorgzadeh E., Sarrafzadeh M., Pattern routing: use and theory for increasing predictability and avoiding coupling // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, vol. 21, no. 7, pp. 777-790, July 2002, doi: 10.1109/TCAD.2002.1013891.
- [5] Mironov S.E., Shiryayev P.M., Kaidanovich O.Y., Models in the Process of Designing Complex Microelectronic Objects under Conditions of Uncertainty // 2023 XXVI International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), Saint Petersburg, Russian Federation, 2023, pp. 105-109, doi: 10.1109/SCM58628.2023.10159088.
- [6] Ширяев П.М., Миронов С.Э. Алгоритм плотноупакованного размещения транзисторов, учитывающий особенности топологической реализации ячеек БИС // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 9. С. 46-52. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-9-46-52
- [7] Dickson C. Global Routing in VLSI: Algorithms, Theory, and Computation. Mac Master University, 2007. 64 p.