

# Трассировка затворных соединений с размещением портов в стандартных ячейках нанометровых СБИС

А. М. Марченко<sup>1</sup>, д-р техн. наук, профессор, Е. А. Попов<sup>1</sup>, инженер, В. Ю. Савченко<sup>2</sup>, аспирант,  
e-mail: [valentine.savchenko@gmail.com](mailto:valentine.savchenko@gmail.com)

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

**Аннотация** — Предложен метод трассировки затворных соединений в стандартных ячейках нанометровых СБИС, совмещенный с установкой входных портов. Метод использует как общий математический подход с работой на графовой модели, так и эвристики, специфичные для современных нанометровых технологий.

**Ключевые слова** — синтез топологии, трассировка, стандартные ячейки, размещение портов.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Современные нанометровые технологии определяют систему сложных ограничений на топологию стандартной ячейки. Отчётливо прослеживается тенденция к усложнению ограничений при переходе на следующее семейство технологий (technology node). Усложнение ограничений приводит к тому, что синтез топологии библиотечных элементов становится всё более трудоёмким процессом, это повышает привлекательность автоматических методов синтеза топологии стандартных ячеек.

САПР для размещения и трассировки на уровне ИС в основном используют сеточные методы трассировки [1]. Отталкиваясь от этой особенности можно сформулировать следующие критерии качества расположения портов и соединений в стандартной ячейке:

- Порты необходимо располагать согласно сеткам, которые будут использованы при трассировке ИС.
- Соединение, лежащее в слое выше, чем порт, не должно блокировать доступ к порту с более высоких слоёв.
- Соединение, принадлежащее одному слою с портом, полезно располагать на сетке.
- Соединения и порты желательно прокладывать так, что доступ к портам был возможен с наибольшего числа направлений.
- Соединения и порты ячейки целесообразно располагать на достаточном удалении друг от друга для облегчения работы трассировщика на кристалле [1].

Одной из характеристик шаблона библиотеки является расположение шин земли и питания относительно границ ячеек. Широкое распространение в промышленности получили шаблоны, согласно которым шины располагаются над верхней и нижней границей ячейки [2].

Анализ библиотек указанного типа, выполненных вручную опытными топологами, показал целесообразность раздельной трассировки сегментов цепей, подключённых к стокам и истокам транзисторов, и сегментов цепей, подключённых к затворам транзисторов. Такая декомпозиция позволяет автоматизировать некоторые приёмы, используемые топологами, и эффективно планировать порты ячейки в ходе трассировки соединений. Предлагаемый в статье метод решает задачу трассировки затворного региона. По сути, это задача однорядной канальной трассировки [3], обобщённая на случай нескольких слоёв трассировки. Для решения применяется метод, основанный на раскраске графа пересечений [4].

## II. ТРАССИРОВКА ЗАТВОРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ПОРТОВ

Ставится задача соединить затворные цепи стандартной ячейки в слоях металлизации  $M_1, \dots, M_k$  с установкой портов, удовлетворяющих сформулированным выше критериям. Типичное число слоёв металлизации, доступных для трассировки и размещения портов в стандартных ячейках: два или три слоя.

Алгоритм трассировки затворных соединений и портов состоит из 5 этапов:

- Вывод точек подключения затворов в слой металлизации.
- Построение линейно упорядоченного списка точек подключения цепей и набора сегментов цепей.
- Определение оптимального порядка раскраски сегментов и построение графа пересечений.
- Раскраска графа пересечений.
- Детальная трассировка и установка портов.

### A. Вывод точек подключения затворов в слой металлизации

Для трассировки в слоях металлизации необходимо рассчитать координаты (ординату, т.к. абсцисса совпадает с абсциссой затвора) всех точек подключения, и вывести их из слоя поликремния в слой первого металла  $M_1$ .

Возможное расположение выходов затворов в канал изображено на Рис. 1 и классифицировано следующим образом:

- Затвор  $P$  типа.
- Затвор  $N$  типа.
- Затвор  $NP$  типа.
- Два затвора  $N$  и  $P$  типов.

При расчете ординат точек подключения применяется эвристика, учитывающая тип расположения затворов, направление, с которого затворная цепь будет подключена к диффузионным сегментам, ширину центрального канала и доступное количество трекков для трассировки.

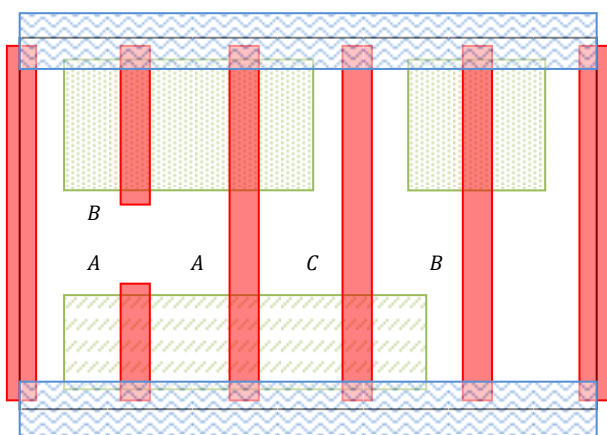


Рис. 1. Варианты выхода затворов в центральный канал стандартной ячейки

### B. Построение линейно упорядоченного списка точек подключения цепей и набора сегментов цепей

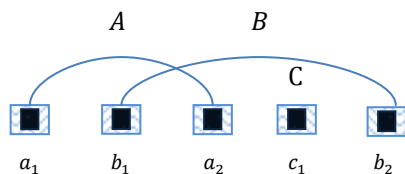


Рис. 2. Диаграмма линейно упорядоченных точек подключения

Алгоритм канальной трассировки должен получить на входе линейно упорядоченный список точек подключения соединений, поэтому порядок выводов затворов 4-го типа в этом списке определяется в соответствии с эвристикой, направленной на минимизацию числа пересекающихся сегментов. Все остальные типы

выводов упорядочиваются по абсциссе. Каждая затворная цепь разбивается на сегменты. Две ближайшие друг к другу точки подключения одной цепи определяют один сегмент цепи (сегмент  $C$  на Рис. 2 – тривиальный сегмент).

В случае неудачи при трассировке сегмента, установке портов или присоединении портов к сегменту, производится шаг возврата к предыдущему сегменту: удаляются все оттрассированные части текущего сегмента и осуществляется попытка найти другое расположение портов для предыдущего сегмента. Если текущий сегмент – первый сегмент в упорядоченном списке сегментов, то трассировка затворных цепей считается неудачной.

### C. Определение оптимального порядка раскраски сегментов и построение графа пересечений

Для нахождения оптимального порядка раскраски сегментов выписывается список линейно упорядоченных точек подключения. Кроме этого необходимо создать граф пересечений сегментов: в начальный момент он содержит только вершины, соответствующие сегментам, и не содержит ребер. Процедура создания графа состоит из следующих шагов:

- 1) добавить тривиальные сегменты в упорядоченный список. Например, сегмент  $C$  на Рис. 2.
- 2) удалить одиночные точки подключения. К примеру, точка  $c_1$  на Рис. 2.
- 3) определить кратчайший сегмент. Сегмент, в границах которого находится наименьшее число точек подключения других цепей, называется кратчайшим. К примеру, сегмент  $(a_1, a_2)$  на Рис. 2. Если сегментов больше нет, то алгоритм завершается.
- 4) добавление кратчайшего сегмента в упорядоченный список.
- 5) создание ребер в графе пересечений. Для каждой точки подключения, попавшей в границы текущего сегмента, создается ребро между текущим сегментом и сегментом точки подключения. Например, ребро  $A - B$  на Рис. 3.
- 6) удаление текущего сегмента из диаграммы линейно упорядоченных точек подключения.
- 7) переход к шагу 2.

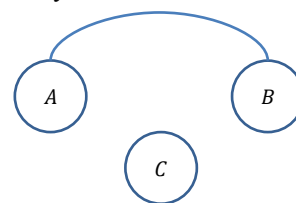


Рис. 3. Граф пересечений

Результатом работы алгоритма являются построенный граф пересечений (Рис. 3) и упорядоченный список сегментов для алгоритма раскраски. Для рассмотренного выше примера порядок раскраски следующий:  $C, A, B$  (вариант  $C, B, A$  тоже корректен).

#### D. Раскраска графа пересечений

Для раскраски графа пересечений применяется жадный алгоритм с эвристиками, использующими информацию об ординатах точек подключений и доступных ресурсах (количество трасс). Если не все сегменты удается раскрасить в заданное количество цветов, алгоритм имеет возможность переокрасить ранее раскрашенные сегменты и вновь попытаться завершить раскраску. В худшем случае будет произведен полный перебор; в реальных примерах шаг переокраски сегмента ни разу не вызывался.

Если граф пересечений невозможно раскрасить в рамках доступных технологических слоев, то задача трассировки затворных цепей считается нерешенной и

необходимо переупорядочивание транзисторов. Если же граф удалось раскрасить, то теперь каждому сегменту каждой затворной цепи соответствует некоторый цвет. Цвет представляет собой пару  $(m_i, s_j)$ , где  $m_i$  – технологический слой металлизации, а  $s_j$  – область трассировки  $P$  или  $N$ . Упорядоченное множество цветов строится в соответствии с технологией, определяющей порядок следования слоёв, и шаблоном библиотеки, определяющим множество доступных слоёв.

Таким образом, в результате раскраски графа пересечений каждому сегменту поставлены в соответствие слой и область трассировки: в какой части ячейки относительно точек подключения проводить трассировку.

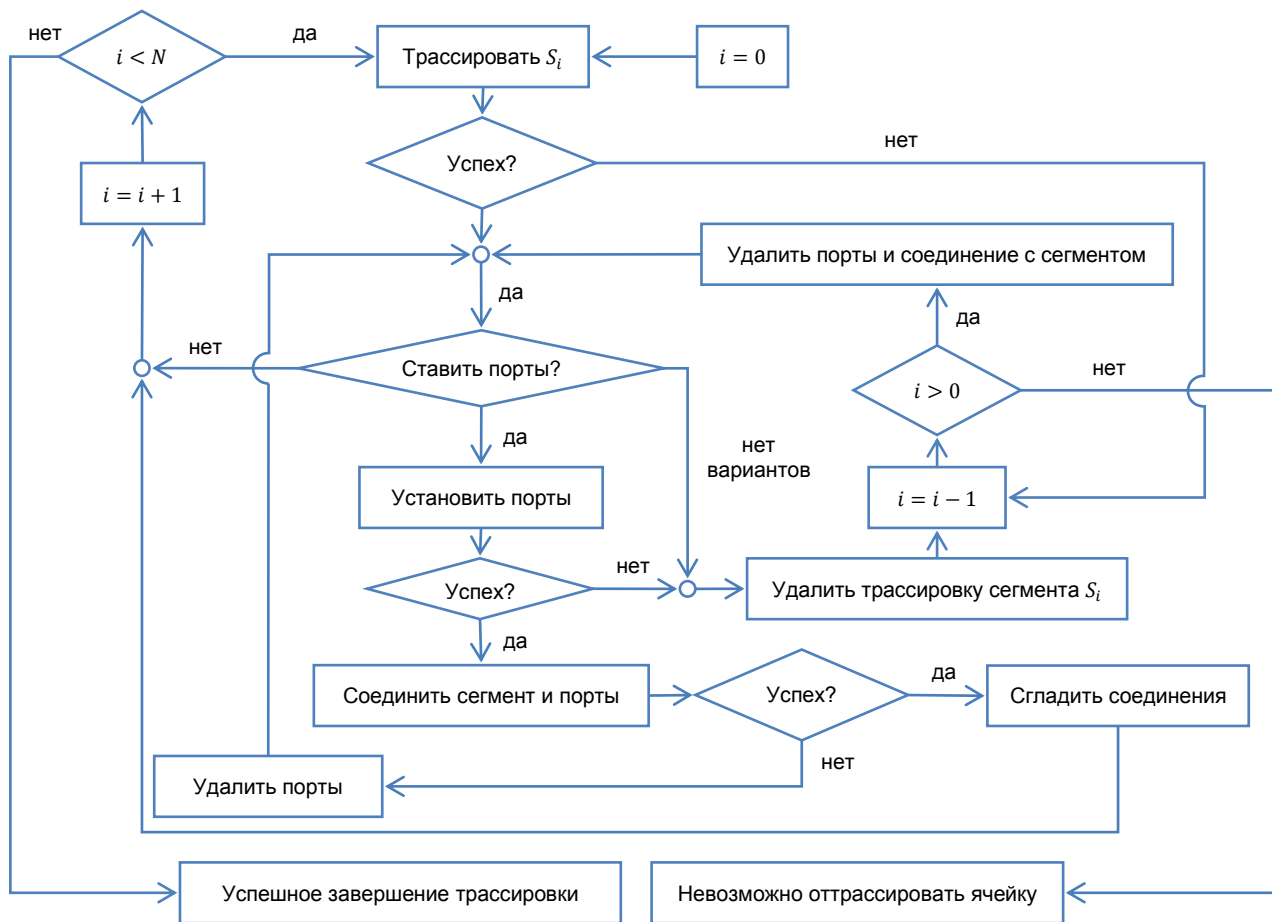


Рис. 4. Блок-схема алгоритма трассировки и установки портов

#### E. Детальная трассировка и установка портов

Блок-схема алгоритма трассировки и расстановки входных портов с учетом доступных ресурсов приведена на Рис. 4.

Трассировка начинается с первого сегмента в соответствии с упорядоченным списком сегментов. Если детальная трассировка сегмента  $S_i$  прошла успешно, алгоритм переходит к установке портов.

Порты после трассировки сегмента ставятся при выполнении трёх условий:

- Трассируемый сегмент – сегмент входной цепи.
- Текущий сегмент является последним сегментом цепи в упорядоченном списке сегментов.
- Есть допустимый вариант установки портов.

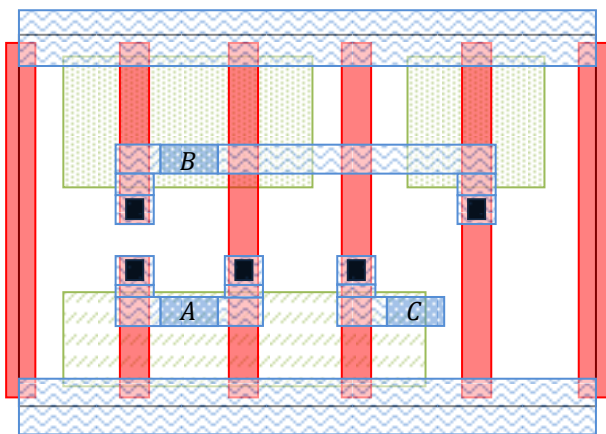
При постановке портов на цепь определяется набор узлов, которые будут рассматриваться в качестве кандидатов. Узлы определяются технологическими сетками на слоях и упорядочены по удаленности от сегментов обрабатываемой цепи. Узлы, заблокированные другими цепями, исключаются из списка. Задействованные кандидаты удаляются из списка узлов при попытке расстановки портов.

Если установка портов прошла успешно, алгоритм переходит к шагу дотрассировки цепи. На этом шаге трассируются соединения портов с сегментами цепи, т.к. в общем случае порты могут стоять достаточно далеко от сегментов. Если трассировка прошла успешно, то алгоритм переходит к шагу сглаживания трассы.

Сглаживание трассы необходимо для удаления мелких углов и выравнивания соединений с учетом установленных портов. Этот шаг всегда завершается успешно.

В случае неудачи при трассировке сегмента, установке портов или при соединении портов с сегментом, производится шаг возврата к предыдущему сегменту: удаляются все оттрассированные части текущего сегмента, и производится попытка найти другое расположение портов для предыдущего сегмента. Если текущий сегмент - это первый сегмент в упорядоченном списке сегментов, то трассировка затворных цепей считается неудачной.

В случае успешной трассировки последнего сегмента трассировка считается успешно завершённой.



**Рис. 5. Результат работы алгоритма трассировки затворных цепей**

Результат работы алгоритма трассировки затворных соединений и установки входных портов изображен на Рис. 5.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Помимо предложенного в статье метода расстановки портов, известны другие подходы к решению этой задачи:

- Установка портов до трассировки соединений – возможно создание нетрассируемых конфигураций в плотных топологиях.
- Установка портов после трассировки всех цепей путем трансформации цепей – большие временные затраты, непредсказуемые позиции портов и достаточно низкий процент успешных расстановок.

В отличие от этих двух подходов предложенный метод имеет следующие преимущества:

- Приёмы размещения портов, принятые при ручном проектировании топологии, рассматриваются в качестве рекомендаций, которые можно варьировать для успешного завершения трассировки, а не как жёсткие ограничения.
- Учёт части правил проектирования позволяет снизить время сжатия топологии. Эксперименты показали, что время сжатия полностью оттрассированной топологии удаётся уменьшить в среднем на 30%.

К недостаткам метода можно отнести:

- Предположение о возможности декомпозиции трассировки хорошо работает (трассируется 90% ячеек) для комбинационных ячеек, и плохо для ячеек памяти (трассируется 15% ячеек).
- Известны практические примеры на библиотеках малой высоты, которые требуют использования более высоких слоёв для трассировки затворных сегментов в первую очередь.
- При последовательной трассировке цепей очень сложно учитывать условные технологические ограничения.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Lefebvre M., Marple D., Sechen C. The Future of Custom Cell Generation in Physical Synthesis // Proceedings of the 34th Design Automation Conference. 1997. P. 446-451.
- [2] Guan B., Sechen C. Efficient standard cell generation when diffusion strapping is required // Proceedings of the IEEE Custom Integrated Circuits Conference. 1996.
- [3] Shuji Tsukiyama, Ernest S. Kuh, Isao Shirakawa An Algorithm for Single-Row Routing with Prescribed Street Congestions // TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS. September, 1980. Vol. cas-21. № 9. P. 765-772.
- [4] Казеннов Г.Г., Щемелинин В.М. Топологическое проектирование нерегулярных БИС. М.: Высшая школа, 1990.