

Алгоритм модификации топологии стандартных ячеек СБИС с целью учёта эффекта электромиграции

К.С. Муханов, М.А. Сотников

ООО «Фрискейл Семикондактор», K.Mukhanov@freescale.com

Аннотация — В данной статье рассмотрена проблема автоматического улучшения качества топологии стандартных ячеек СБИС путём учёта эффекта электромиграции. Предложено усовершенствование алгоритма модификации топологии, основанного на графе ограничений. Предложенное усовершенствование, используя данные, полученные программой ClariNet после анализа исходной ячейки, позволяет произвести коррекцию топологии для повышения её электромиграционной стойкости. Эффективность предложенного алгоритма подтверждена сравнением электромиграционных характеристик топологии стандартных ячеек до и после их коррекции.

Ключевые слова — электромиграция, сжатие топологии, стандартные ячейки.

I. ВВЕДЕНИЕ

Надежность интегральных микросхем в основном определяется характером и скоростью физико-химических процессов деградации, протекающих в конструктивных элементах. В современных СБИС проводники занимают 50-80% площади кристалла и определяют надежность микросхемы. Для современных СБИС одним из доминирующих механизмов отказа является электромиграция в межэлементных соединениях. Отказы металлизации чаще всего возникают под влиянием токов повышенной плотности [1].

Плотность тока обратно пропорциональна площади сечения проводника, и если принять, что толщина проводников интегральной схемы постоянна, то значит, плотность тока обратно пропорциональна ширине проводника. Отсюда следует, что увеличение ширины подверженных электромиграции проводников уменьшит вероятность отказа схемы. Также, распределение плотности тока зависит не только от ширины проводника, но и от его формы (количества поворотов) и от количества контактных окон (переходов в другие слои). Соответственно, наиболее точный анализ влияния эффекта электромиграции можно провести только на готовой топологии. Существуют программы, которые производят расчёт статистических плотностей тока в разных участках металлических проводников, и как следствие – ширины отдельных сегментов этих проводников, достаточных, чтобы исключить эффект электромиграции. Одной из таких программ является ClariNet [2].

После анализа подобной программой, интегральная схема должна быть перепроектирована с учётом полученной информации о ширинах. При неизменной площади топологии необходимо найти решение с минимальным отклонением от требуемых ширины про-

водников. Всё это делает процесс перепроектирования топологии достаточно трудоёмким для ручного исполнения.

В данной статье предложен алгоритм автоматической коррекции ширины проводов топологии стандартных ячеек на основании информации, полученной из программы ClariNet. Данный алгоритм выполнен на базе программы модификации топологии, основанной на графе ограничений [3], где заданные на входе ширины представляются дополнительными ограничениями, накладываемыми на геометрическую форму проводов.

II. АЛГОРИТМ

Алгоритм модификации топологии на основе графа ограничений состоит из шагов, показанных на Рис 1.

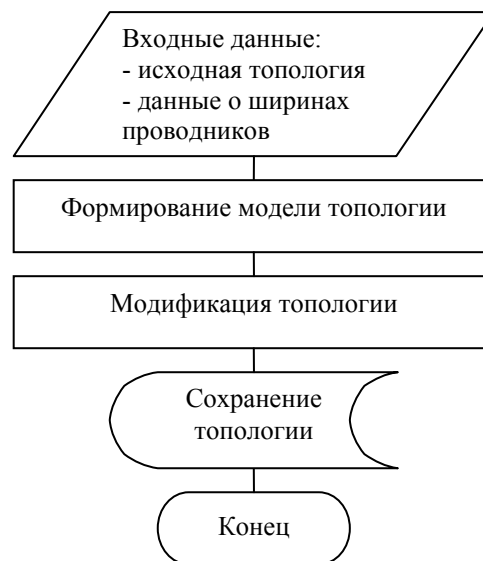


Рис. 1. Алгоритм модификации топологии на основе графа ограничений

В целом, смысл усовершенствования заключается в том, что существующую модель топологии интегральной схемы во время модификации следует дополнить информацией о новых электромиграционных ограничениях. А именно, создать возможность хранить следующие данные: предписанные ширины проводников, текущие ширины и описание той части проводника, которой соответствуют эти сохраненные данные.

Также, усовершенствование алгоритма модификации топологии должно затронуть и процессы, связан-

ные с изменением геометрии интегральной схемы. Необходимо разработать методы, работающие непосредственно с электромиграционными ограничениями, учитывающие требования по отклонению от предписанных проводникам ширин.

В следующих главах будут описаны более подробно все усовершенствования на каждом из этапов исходного алгоритма.

А. Формирование электромиграционной модели данных

Электромиграции подвержены металлические проводники лежащие в пути протекания тока от цепей земли и питания до нагрузочной ёмкости (Рис 2).

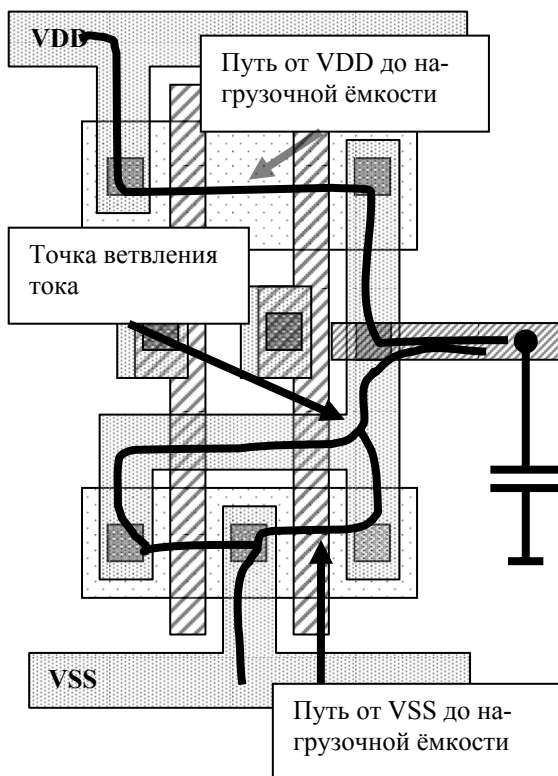


Рис. 2. Пример топологии стандартной ячейки

Этот путь может содержать несколько точек ветвления тока. Такими точками являются межслойные переходы и участки металлических фигур, где сходятся от трёх и более сегментов проводника. Очевидно, что от одной до другой точки ветвления величина тока остаётся неизменной для каждого режима работы схемы. Часть проводника от одной точки ветвления до другой будем называть сегментом проводника. На плотность тока в сегментах проводника будет влиять только их ширина. Следовательно, разным сегментам одного проводника могут соответствовать разные величины предписанной ширины, в зависимо-

сти от формы проводника и количества точек ветвления.

Для формирования электромиграционной модели необходимо выделить сегменты проводника. Сначала нужно разбить весь проводник на вертикальные и горизонтальные составляющие и определить точки ветвления тока, которые обусловлены особенностями формы проводника, или создать так называемую нитевидную модель проводника. Для этого предлагается воспользоваться диаграммой Вороного (Рис 3а) [4]. Вершины диаграммы, у которых более двух рёбер, определяют точки ветвления тока, а рёбра – вертикальные и горизонтальные сегменты. Чтобы завершить формирование нитевидной модели, осталось внести в неё точки ветвления, определяемые межслойными переходами (в т.ч. выходным портом). Для этого находится ребро, которое определяет часть проводника, в которой лежит межслойный переход. Пусть, координатами межслойного перехода будут координаты X и Y его центра. Тогда, если межслойный переход лежит в вертикальном участке проводника, которому соответствует вертикальное ребро нитевидной модели, то вводимая точка ветвления расщепит это ребро на два. Координатами введённой вершины будут Y и X_S , где X_S – координата ребра (Рис 3б).

Таким образом, в результате будет получен некий геометрический граф, представляющий собой нитевидную модель проводника интегральной схемы со всеми точками ветвления тока. Для каждого ребра этого графа строится прямоугольник путём расширения этого ребра во все стороны на величину половины ширины сегмента оригинальной фигуры, которому соответствует данное ребро. Далее для каждого прямоугольника во входных данных из ClariNet находится соответствующее ему значение электромиграционной ширины. Таким образом, каждый такой прямоугольник будет определять сегмент постоянной ширины, и на протяжении модификации топологии будет «помнить» свою предписанную ширину (Рис 3в). Соответственно, электромиграционная модель будет представлять собой набор прямоугольников, определяющих сегменты постоянной ширины проводника, и хранящие следующие данные:

- предписанную ширину
- текущую ширину
- направление сегмента

Следует отметить, что порядок, в котором дополнительные прямоугольники связаны друг с другом, чрезвычайно важен, так как он определяет конкретные ширины сегментов, через которые будет протекать ток между конкретными точками ветвления. Это означает, что в процессе модификации следует сохранить эту связанность. Чтобы добиться сохранения связанности предлагается следующее. Все дополни-

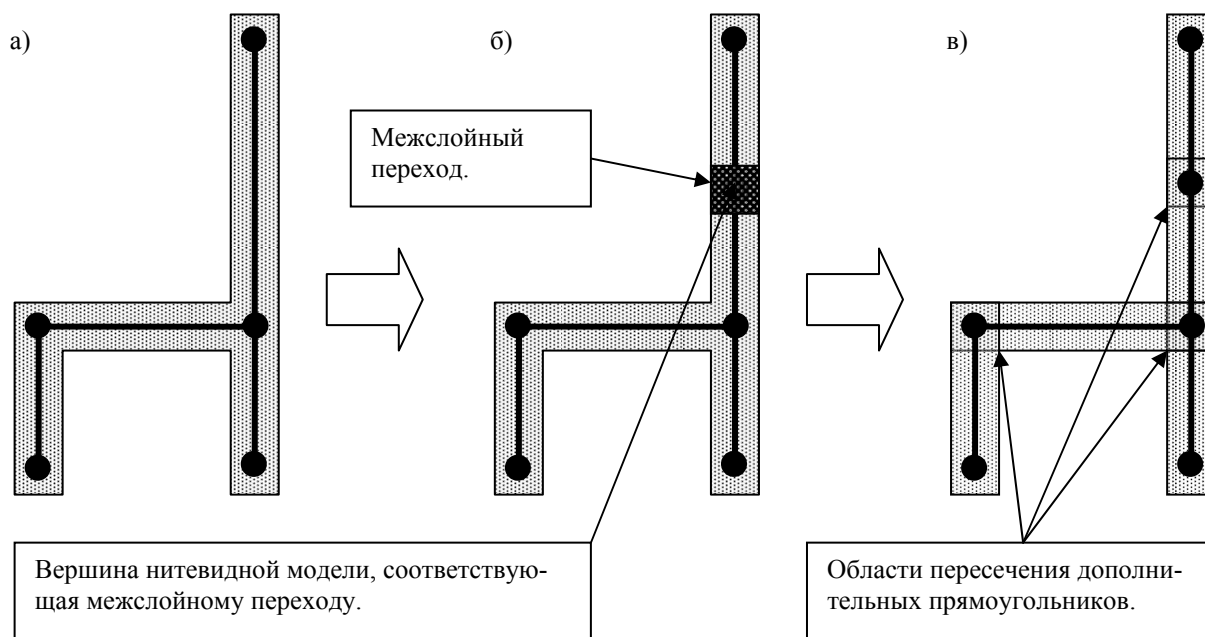


Рис. 3. а) Диаграмма Вороного металлического проводника; б) Вершина нитевидной модели проводника, соответствующая межслойному переходу; в) Дополнительные прямоугольники, построенные на основе нитевидной модели

тельные прямоугольники в топологии, построенные в рамках электромиграционной модели, перекрываются друг с другом, в силу особенности их построения. Это означает, что в область перекрытия каждой пары прямоугольников может быть введена ещё одна дополнительная фигура, которая будет являться своего рода «гвоздём», прокалывающим обе связываемые фигуры. Этот «гвоздь» будет представлять собой квадрат с предписанной ему электромиграционной шириной, равной минимальной из ширин связываемых прямоугольников (Рис 3в). Также, необходимо сохранить положение межслойных переходов относительно дополнительных прямоугольников. Для этого сами межслойные переходы будут являться так называемыми «гвоздями».

В процессе модификации топологии каждый «гвоздь» должен сохранить включение в те сегменты, в которых он изначально находился. Это обеспечивается специальными ограничениями включения, которые будут более подробно описаны в главе, посвящённой построению графа ограничений.

На этом формирование электромиграционной модели завершается и можно перейти к непосредственно этапу модификации топологии.

Б. Модификация топологии на основе графа ограничений

На Рис 4 показан алгоритм этапа модификации топологии.

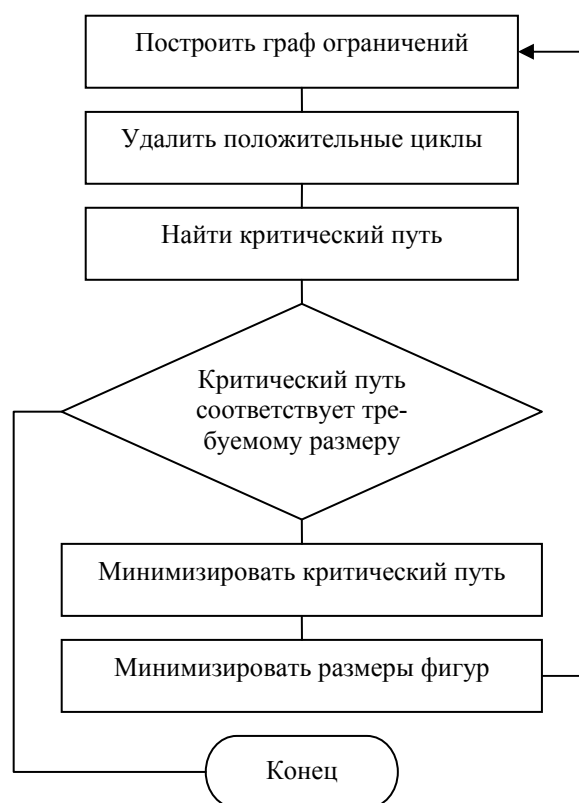


Рис. 4. Этап модификации топологии

Граф ограничений для задачи модификации топологии – это направленный, взвешенный граф $G = (V, E)$, где $V = \{V_i\}$ – множество вершин; $E = \{E_j\}$ – множество ребер.

Каждая вершина V_i графа представляет некоторый объект топологии R_i и характеризуется его координатой C_i , которая равна X или Y координате объекта в зависимости от направления графа. Граф также содержит две дополнительные вершины *Source* и *Sink*. *Source* – это вершина которая не имеет входящих ребер, а *Sink* – выходящих. *Source* и *Sink* представляют воображаемые границы топологии [5].

Ребро описывает множество ограничений между парой объектов и имеет длину L_j , равную величине максимального ограничения. Существует два типа ограничений: минимального расстояния и связности. Первое используется для выполнения минимального расстояния между объектами топологии, а второе для обеспечения их связности. Если от объекта A к объекту B есть ограничение на минимальное расстояние длиной L_{AB} в направлении X , то

$$X_A \geq X_B + L_{AB} \quad (1)$$

Ограничения связности не будут использоваться для учёта электромиграции, поэтому их описание можно опустить.

В. Построение графа ограничений

Для учёта электромиграционных данных во время модификации топологии потребуется два вида электромиграционных ограничений:

- ограничения ширины;
- ограничения включения.

Оба вида этих ограничений – это ограничения минимального расстояния, где объектами являются стороны дополнительных прямоугольников. Действительно, для ограничения ширины объектами будут противоположные стороны одного и того же прямоугольника, а L_{AB} будет равно некой текущей ширине прямоугольника, которая изначально равна предписанной ширине и может сокращаться, например, при минимизации критического пути, о чём будет сказано дальше. Для обеспечения связности прямоугольников дополнительно были введены так называемые «гвозди» – квадраты, лежащие сразу в обеих связываемых фигурах. Следовательно, необходимо, чтобы во время модификации топологии «гвозди» не смогли выйти за их пределы. Соответственно, нужно построить ограничения между однотипными сторонами прямоугольника и «гвоздя» (между правыми сторонами, между верхними и т.д.). Величины ограничений (L_{AB}) будут равны нулю. Такие ограничения называются ограничениями включения (Рис 5).

Для каждого электромиграционного ограничения, введённого в граф, будет сохранена ссылка на допол-

нительный(е) прямоугольник(и) между рёбрами которого(ых) построено данное ограничение.

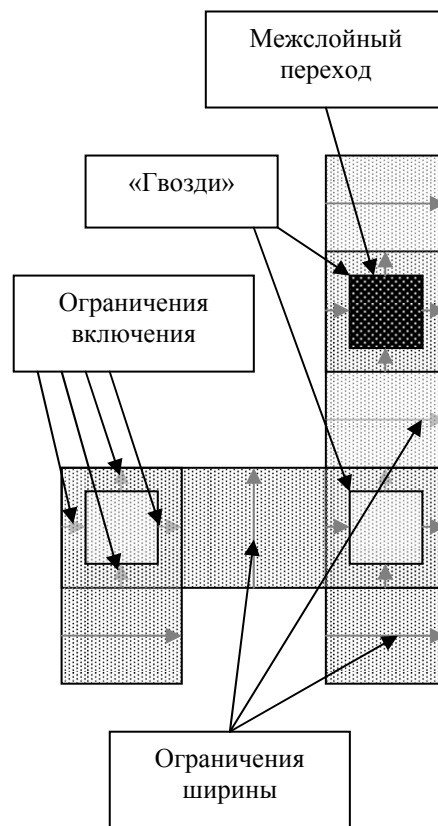


Рис. 5. Пример всех электромиграционных ограничений для металлического проводника

Г. Поиск критического пути

Одним из следующих шагов после построения графа ограничений является определение длиннейшего (критического) пути в графе. Задача определения минимального размера эквивалентна задаче нахождения длиннейшего пути в графе. Если вершину *Source* поставить в нулевую точку, то величина длиннейшего пути от *Source* до некоторой вершины и будет её минимально возможной координатой. Множество ребер, которые определяют минимальное расстояние между вершинами *Source* и *Sink*, формируют критический путь, а вершины и рёбра данного пути называются критическими

Одна из основных трудностей, с которыми придется бороться при модификации топологии с использованием графа ограничений – это положительные циклы (Рис 6).

Если сумма длин всех ребер цикла больше нуля, то данный цикл называется положительным и делает невозможным поиск длиннейшего пути в графе, так как каждый проход по циклу постоянно увеличивает длину этого пути.

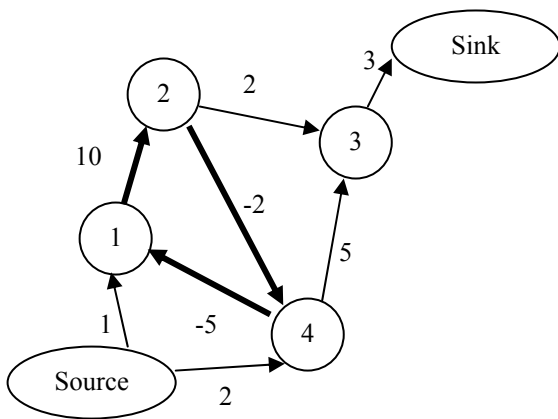


Рис. 6. Пример совокупности технологических ограничений, создающих положительный цикл

С большой долей вероятности можно говорить о том, что в критический путь попадут рёбра ограничений, связанных с электромиграционными ширинами. И именно они создадут положительные циклы и увеличат длину критического пути.

Д. Удаление положительных циклов

Имеющиеся способы удаления положительных циклов не подходят для текущей задачи учёта эффекта электромиграции, поскольку при работе с рёбрами графа эти способы ничего не знают о том, как и на сколько можно отклониться от предписанной величины электромиграционных ограничений.

Для определения величины отклонения, которое можно дать электромиграционным ограничениям, необходимо решить задачу минимизации величин этих отклонений для всех электромиграционных рёбер, которые присутствуют в положительном цикле.

Подобная процедура будет использоваться и для минимизации критического пути, поэтому более подробно она будет рассмотрена в следующем разделе.

Е. Минимизация критического пути

Как и при удалении положительных циклов, существующие способы минимизации критического пути не решают задачу минимизации отклонений для электромиграционных ограничений, поэтому нужен подход, способный ослабить электромиграционные ограничения в соответствии с их значимостью. Здесь речь идёт об ограничениях ширины, поскольку ограничения включения не могут быть ослаблены.

Цель минимизации критического пути – достичь требуемого размера топологии ячейки.

Каждое электромиграционное ограничение ширины обладает информацией о том дополнительном прямоугольнике, между рёбрами которого оно построено. Соответственно, пусть для каждого i -го электроми-

грационного ограничения в критическом пути: w_{oi} – предписанная на входе ширина прямоугольника, w_i – текущая ширина прямоугольника, x_i – размер нового отклонения, т.е. величина, на которую необходимо будет уменьшить текущую ширину i -го прямоугольника, ΔL – величина, на которую должна измениться длина всего критического пути. Количество электромиграционных ограничений в критическом пути равно n .

Отсюда можно записать следующие условия:

$$\begin{cases} \sum_i^n x_i = \Delta L \\ x_i \leq w_i - w_{\min}, i = 1 \dots n \\ x_i \geq 0, i = 1 \dots n \end{cases} \quad (2)$$

Где w_{\min} – минимально возможная ширина (минимальная ширина металла).

$$f(x) = \sum_i^n \left(\frac{w_{oi}}{w_i} \cdot x_i \right) \rightarrow \min \quad (3)$$

Здесь $f(x)$ является целевой функцией для задачи минимизации отклонений для электромиграционных ограничений в критическом пути. w_{oi} / w_i – весовой коэффициент каждого отклонения, который отражает следующую суть: чем больше уже существующее отклонение от предписанной ширины, тем меньше должно быть новое отклонение.

Для полноты формулировки задачи минимизации осталось определить ΔL . Пусть L_o – целевой размер топологии, L – текущий размер, тогда

$$\begin{aligned} \Delta L \in (0, L - L_o] \\ L > L_o \end{aligned} \quad (4)$$

Выбор конкретной величины ΔL – это поиск компромисса между скоростью сходимости и качеством учёта электромиграции, поскольку при значениях ΔL близких к разнице текущего и желаемого размера топологии, ограничения электромиграционных ширин могут быть чрезмерно уменьшены. С другой стороны, при значениях ΔL близких к нулю, может потребоваться большое количество итераций, пока не будет достигнут целевой размер топологии.

Здесь предлагается воспользоваться фиксированной величиной ΔL , которая будет найдена экспериментально.

Теперь задачу минимизации целевой функции (3) можно решить с помощью симплекс-метода, в результате чего будут найдены величины x_i , которые позволят сократить длину критического пути до требуемой величины.

Новые значения электромиграционных ширин с учётом найденных значений x_i , будут сохранены как

текущие для каждого прямоугольника, чьё электромиграционное ограничение попало в критический путь. Как говорилось выше, на этапе построения очередного графа, для каждого электромиграционного прямоугольника строится ограничение ширины, величина которого хранится в модели как текущее значение. Изначально все текущие значения ширин равны предписанным со входа ширинам, и в процессе модификации топологии могут уменьшаться.

После уменьшения критического пути и сдвига объектов топологии согласно полученному графу ограничений, на новой итерации найдётся новый критический путь. За несколько итераций будет достигнут целевой размер, что и станет условием остановки модификации.

III. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА

Для оценки эффективности предложенного подхода проведем улучшение стандартных ячеек спроектированных вручную с учетом эффекта электромиграции.

Чтобы сделать сравнение полученных и исходных ячеек, введём для этого метрики электромиграционного качества топологии EMQ_{\min} и EMQ_{aver} :

$$EMQ_{\min} = \min_{i=1..n} (w_i / w_{oi})$$

$$EMQ_{aver} = \frac{\sum_i^n w_i / w_{oi}}{n} \quad (5)$$

где w_i – текущая ширина i -го дополнительного прямоугольника, w_{oi} – предписанная ширина (ширина вычисленная программой ClariNet), того же прямоугольника; EMQ_{\min} и EMQ_{aver} – минимальное и среднее отклонение от предписанной ширины соответственно.

Значения предложенных метрик для каждой ячейки до и после улучшения представлены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение метрики EMQ для стандартных ячеек до и после автоматического улучшения

N	После улучшения		До улучшения	
	EMQ_{\min}	EMQ_{aver}	EMQ_{\min}	EMQ_{aver}
1	1,00	1,00	0,83	0,98
2	1,00	1,00	1,00	1,00
3	0,75	0,99	0,61	0,98
4	0,67	0,99	0,46	0,98
5	0,43	0,98	0,37	0,92
6	0,24	0,85	0,18	0,78
7	1,00	1,00	1,00	1,00
8	0,39	0,96	0,39	0,93
9	1,00	1,00	0,85	0,99

10	0,73	0,99	0,69	0,99
11	0,87	0,99	0,48	0,97
12	0,75	0,99	0,48	0,97
13	1,00	1,00	1,00	1,00
14	0,73	0,99	0,69	0,98
15	0,59	0,97	0,37	0,95
16	1,00	1,00	0,69	0,98
17	1,00	1,00	0,75	0,98
18	1,00	1,00	1,00	1,00
19	0,69	0,99	0,69	0,98
20	1,00	1,00	1,00	1,00

Как видно из таблицы, минимальное и среднее значения метрик EMQ для всех ячеек увеличились, что говорит о том, что предложенный алгоритм позволил повысить электромиграционное качество вручную спроектированных топологий. И надо отметить, что увеличение EMQ_{\min} показывает улучшение самых критичных участков топологии – имеющих ширину с самым большим отклонением от предписанной.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье предложено усовершенствование алгоритма модификации топологии с целью улучшения качества стандартных ячеек СБИС путём учёта эффекта электромиграции. Описанный подход позволил повысить электромиграционную стойкость вручную спроектированных топологий, основываясь на данных полученных программой ClariNet. Эффективность подхода продемонстрирована результатами экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] В.Б. Блохина Модель надежности пленочных проводников СБИС с учетом процесса электромиграции // Седьмая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых ВНКФ-7. Сборник тезисов. – Санкт-Петербург, 2001.
- [2] Rafi Levy, David Blaauw, Gabi Braca, Amir Grinshpon, Chanhee Oh, Boaz Orshav, Vladimir Zolotov ClariNet: A Noise Analysis Tool and Methodology for Deep-Submicron Design // ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC), June 2000, pg. 233-238.
- [3] В.П. Розенфельд, М.А. Сотников, И.Г. Топузов, Э.А. Улуханов, Е.Г. Широ Система сжатия и миграции топологии стандартных ячеек // I Всероссийская Научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем» / Сб. научных тр. под общ. ред. А.Л. Стемпковского. – М.: ИППМ РАН. - 2005. - С. 121-127.
- [4] Martin Held Voronoi Diagrams and Offset Curves of Curvilinear Polygons // Dept. of Applied Mathematics and Statistics. June 19, 1997.
- [5] М.А. Сотников Разработка и исследование алгоритмов сжатия топологии стандартных ячеек субмикронных СБИС // ЗАО "Моторола ЗАО", Москва, 2004.