

УДК 681.325

И.П. Логинова, Л.Д. Черемисинова

МИНИМИЗАЦИЯ НА ТОПОЛОГИЧЕСКОМ УРОВНЕ ПЛОЩАДИ РЕГУЛЯРНЫХ СХЕМ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИЕМ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

Исследуется проблема оптимизации площади одного из типов матричных структур управляющей логики заказных СБИС на основе регулярных схем с последовательным соединением МОП-транзисторов (РМОП-схем) на этапе топологического проектирования. Рассматриваются особенности структурной организации топологии РМОП-схем и возможности минимизации площади кристалла, основанной на свертке. Определяются ограничения, накладываемые особенностями топологии РМОП-схемы на вид ее свертки. Показывается, как эти ограничения могут быть учтены при двудольной свертке РМОП-схемы.

Введение

В настоящее время проектирование макроблоков управляющей логики заказных СБИС, как правило, ориентировано на использование схем с регулярной структурой. Их применение позволяет уменьшить стоимость разработки схемы за счет минимизации времени проектирования в силу упрощения задачи автоматической генерации топологии [1, 2] по структурному (или функциональному) описанию реализуемого устройства.

Широкое применение для проектирования управляющей логики получили регулярные структуры типа программируемых логических матриц (ПЛМ), в основе которых лежит параллельное соединение транзисторов, обеспечивающее достаточно высокое быстродействие схем, и РМОП-схемы, в основе которых лежит последовательное соединение транзисторов [2]. При проектировании заказных СБИС реализация регулярных структур ориентирована, как правило, на технологию изготовления СБИС. РМОП-схемы, выполняемые по КМОП-технологии, используются в тех случаях, когда к задержке схем не предъявляются слишком жесткие требования, и в то же время требуется обеспечить малую потребляемую мощность и сокращение площади, занимаемой на кристалле.

Топология регулярных структур (ПЛМ, РМОП-схем) создается путем объединения топологий готовых базовых ячеек в двухмерный массив. Соединения между соседними ячейками в строках массива создаются с помощью примыканий [3]. Такие регулярные структуры имеют прямую аналогию с двухуровневым представлением булевых функций. Параметры этого представления определяют размеры топологической реализации соответствующего функционального описания. За основной критерий оптимизации при проектировании регулярных структур СБИС принимается площадь кристалла. Площадь, которую занимает на кристалле РМОП-схема, существенно зависит от сложности ее функционального описания на языке высокого уровня, а точнее, от сложности соответствующей системы дизъюнктивных нормальных форм (ДНФ). Соответственно оптимизация площади на этапе логического проектирования достигается совместной минимизацией булевых функций системы в классе ДНФ. В случае РМОП-структур имеет смысл раздельная минимизация булевых функций.

Существенный недостаток регулярных матричных структур [4–6] заключается в неэффективности использования площади кристалла, обусловленной сильной разреженностью матриц. Вследствие этого значительное число транзисторов в матрицах не принимает участия в реализации функциональности управляющей логики. Помимо того, что доля незадействованных транзисторов приводит к увеличению площади на кристалле СБИС, их присутствие увеличивает задержку сигнала и энергопотребление РМОП-схемы [7]. Минимизация площади регулярной структуры на этапе топологического проектирования состоит в ее уплотнении путем сокращения числа неиспользуемых транзисторов. Один из ранее применявшихся на практике способов топологической оптимизации заключался в разбиении представления матричной структуры на «густые аппликации» (прямоугольники из транзисторов) и их «сшивании». Этот метод позволял локально оптимизировать матричную структуру.

Выходной буфер РМОП-схемы образуют пары следующих друг за другом инверторов. РМОП-схема управляется дополнительным входным сигналом, соответствующим синхросигналу clk , питается от источника питания U и реализует следующую систему ДНФ:

$$\begin{aligned} y_1 &= \bar{x}_4 \bar{x}_5 \vee x_3 x_5; \\ y_2 &= \bar{x}_1 x_2 x_3 \vee \bar{x}_3 x_5; \\ y_3 &= \bar{x}_2 \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 x_2 \vee x_1 x_3; \\ y_4 &= x_4 \bar{x}_5 \vee \bar{x}_3 \bar{x}_5. \end{aligned} \quad (1)$$

2. Особенности топологической реализации рассматриваемых РМОП-схем

Программы кремниевой компиляции транслируют описание оптимизированной двухуровневой логической структуры матричного вида в готовый топологический чертеж, составленный из элементов библиотеки, которые представляют собой топологические чертежи базовых ячеек. Алгоритм трансляции использует так называемый топологический план матричной структуры, который является не чем иным, как символической графической интерпретацией алгоритма соединения (сборки) в нужной комбинации необходимого числа базовых ячеек.

Компоненты топологического плана РМОП-схемы состояются из геометрических фигур (прямоугольников), входящих в состав укрупненных блоков плана. Расположение и размеры компонентов топологического плана взаимозависимы и взаимосвязаны. Центральным элементом является блок, определяющий форму топологии матрицы И. Геометрические размеры и структура блока (состав базовых ячеек, его наполняющих) существенно определяют вид, размеры и положение других топологических компонентов, их связи. Необходимым условием топологической оптимизации матричной структуры РМОП-схемы методом свертки является получение такой топологии, которая вкладывается в топологический план РМОП-схемы по всем технологическим показателям. Для этого необходимо проводить свертку матричной структуры так, чтобы удовлетворить всем ограничениям, задаваемым топологическим планом.

Для выявления ограничений, которые необходимо соблюдать при свертке РМОП-схемы, рассмотрим структуру ее топологического плана с укрупненными блоками (рис. 2). На этом плане можно выделить десять основных структурных блоков, обозначенных на рис. 2, *a* римскими цифрами и представленных прямоугольными областями. Приведем краткое описание их назначения и состава, имея в виду, что за единицу измерения высоты и ширины ячеек блоков приняты соответствующие размеры ячеек, составляющих строки матрицы И, и что ячейки, входящие в состав блоков I, III–VII, имеют высоту, кратную высоте этих ячеек.

Блок I. Матрица И (или матрица программирования). Ее строки образуют цепочки n МОП-транзисторов, связанных последовательно путем соединения стока одного транзистора с истоком другого. Эта матрица соответствует структурной матрице И и состоит из $2n \times k$ ячеек одного и того же топологического размера, где n – число входов схемы, k – число строк матрицы (реализующих конъюнкции ДНФ). Каждая ячейка состоит из одного n МОП-транзистора, который может находиться во включенном состоянии, если его затвор соединен с одной из вертикальных шин подвода входных сигналов, или в выключенном состоянии, если его затвор замаскирован.

Блок II. Входные буферы. Входные буферы расположены плотно друг за другом по горизонтали и обеспечивают подведение входных сигналов в прямом и инверсном виде к каждой паре столбцов матрицы И. Входной буфер представляет собой столбец ячеек двойной ширины, обеспечивающих реализацию пары инверторов и нагрузочных транзисторов.

Блок III. Подвод «земли» к строкам. Столбец состоит из k одинаковых ячеек, обеспечивающих подведение сигналов «земли» к строкам матрицы И.

Блок IV. Переходные ячейки. Столбец состоит из одинаковых ячеек, обеспечивающих съём сигналов со строк матрицы И.

Блок V. Проводные дизъюнкции. Столбец из k ячеек условно можно разделить на m секций, где m – число выходов РМОП-схемы. Каждая секция состоит из верхней, нижней и промежуточных ячеек. Ячейки секции обеспечивают реализацию проводной дизъюнкции (дизъюн-

ктивного объединения) сигналов, снимаемых со строк соответствующей секции матрицы И, и подведение полученного сигнала к блоку VII.

Блок VI. Выходные нагрузки строк матрицы И. Столбец состоит из k одинаковых ячеек, содержащих по одному рМОП-транзистору, который играет роль выходной нагрузки (управляемой синхросигналом clk).

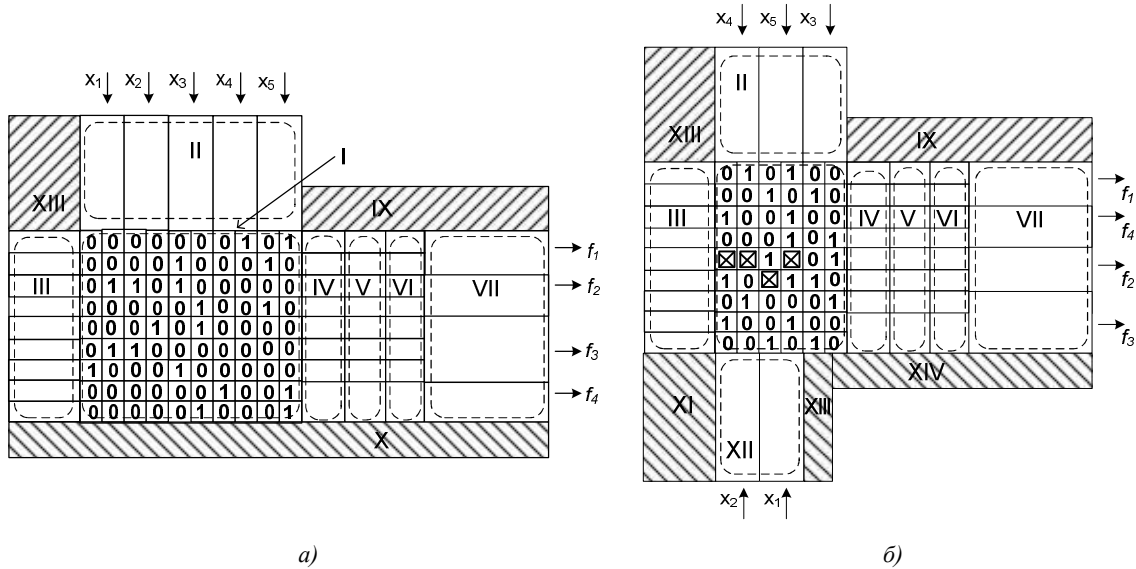


Рис. 2. Структуры топологических планов РМОП-схем: а) несвернутой РМОП-схемы; б) свернутой

Блок VII. Съем выходных сигналов. Столбец условно делится на m секций того же размера по высоте, что и секции блока V. Каждая i -я секция ($i = 1, 2, \dots, m$) состоит из нескольких переходных ячеек и одной ячейки двойной высоты, которая содержит пару инверторов и реализует i -й выходной сигнал РМОП-схемы в прямом и инверсном виде, а также информационно связана с i -й секцией ячеек блока V. Нижние границы i -х секций ячеек блоков V и VII находятся на одном уровне.

Блок VIII. Подвод «земли» к входным буферам.

Блок IX. Подвод «питания» и синхросигнала к входным буферам.

Блок X. Нижнее обрамление схемы.

Обратим внимание на следующие особенности топологической организации рассматриваемых РМОП-схем, важные для дальнейшего изложения:

1. Согласно топологическому плану нижняя ячейка каждой секции блока VII съема выходных сигналов имеет двойную высоту, что предполагает наличие в секции не менее двух строк. Если же ДНФ некоторой реализуемой РМОП-схемой функции состоит из одной конъюнкции, то соответствующая ей секция матрицы И дополняется еще одной «пустой» строкой из ячеек с замаскированными транзисторами, которая завершается в блоке VI ячейкой с рМОП-транзистором.

2. Для обеспечения нормального функционирования электрической схемы длина канала нагрузочных транзисторов на входе РМОП-схемы (блок II) должна быть подобрана в соответствии с величиной задержки сигнала с входа на выход схемы. Задержка рассчитывается в процессе схемотехнического моделирования. Увеличение длины канала нагрузочных транзисторов, обусловленное ростом задержки, достигается введением d дополнительных ячеек ($d \in \{0, 1, 2, 3\}$) в каждую из четырех секций всех входных буферов (рис. 3, б). Минимальная длина канала нагрузочного транзистора соответствует отсутствию дополнительных ячеек, т. е. $d = 0$ (рис. 3, а). Увеличение числа ячеек столбцов входных буферов приводит к соответствующему увеличению числа ячеек блоков VIII и IX.

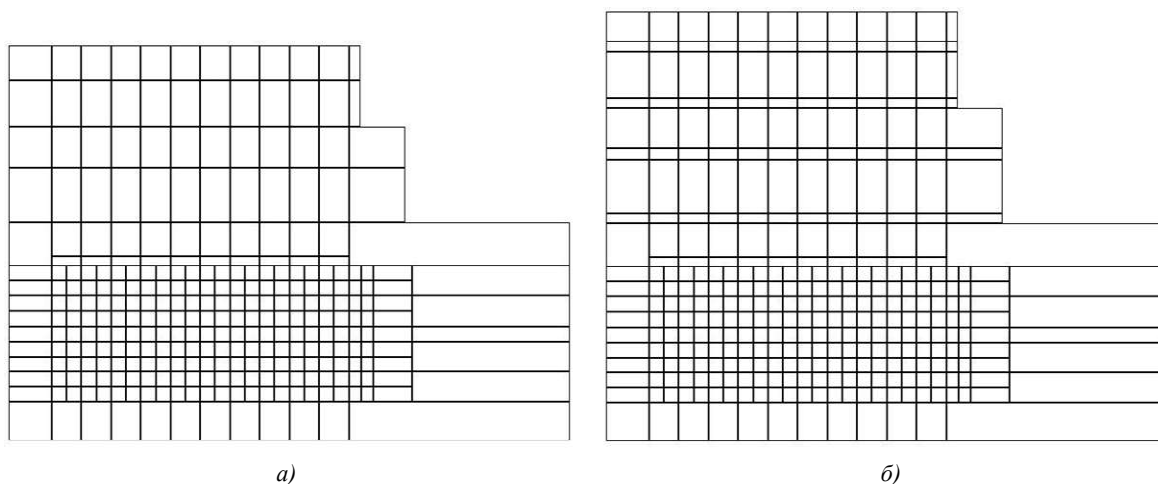


Рис. 3. Топологические планы РМОП-схем с секционированной длиной канала нагрузочных транзисторов: *а)* с минимальной длиной канала при $d = 0$; *б)* увеличенной длиной канала при $d = 1$

3. Оценка площади кристалла, занимаемой РМОП-схемой

Подсчитаем площади структурных блоков топологического плана РМОП-схемы, приняв за условную единицу площади (у.е.п.) площадь основной ячейки матрицы И. Для норм технологического процесса $\lambda = 0,8$ мкм, площадь равна $1 \text{ у.е.п.} = 6,4\lambda \cdot 6,4\lambda$.

В таблице приведены площади ячеек структурных блоков РМОП-схемы и формулы подсчета площади блоков в зависимости от основных параметров РМОП-схемы. Здесь структурные блоки XI – XIV присутствуют только в свернутой РМОП-схеме (см. рис. 2, б), при этом величина n' определяет число входных сигналов схемы, подаваемых с нижней стороны матрицы. Просуммировав значения блоков I – X, приведенные в последнем столбце таблицы, получим зависимость площади кристалла, занимаемой РМОП-схемой (несвернутой), от чисел n ее входов, k строк матрицы И и d дополнительных секций входных нагрузочных транзисторов (т. е. от задержки сигнала схемой):

$$S = (2n \cdot k + (29 + 5d) \cdot n + 22k + 13d + 167) \text{ у.е.п.} \quad (2)$$

Таким образом, для случая минимальной входной нагрузки ($d = 0$) площадь кристалла, занимаемая РМОП-схемой, получается равной

$$S_0 = (2n \cdot k + 34n + 22k + 167) \text{ у.е.п.}, \quad (3)$$

а для случая максимальной входной нагрузки ($d = 3$) –

$$S_3 = (2n \cdot k + 49n + 22k + 176) \text{ у.е.п.} \quad (4)$$

К примеру, реализация на кристалле РМОП-схемы, схемотехническое представление которой показано на рис. 1, имеет следующие площади для случаев минимальной и максимальной входных нагрузок: $S_0 = 600$ у.е.п., $S_3 = 714$ у.е.п.

4. Особенности топологической оптимизации РМОП-схемы методом свертки

В зависимости от числа совмещаемых столбцов или строк (или числа разрывов в столбцах или строках свернутой матрицы И) свертка может быть простой или многократной. При простой свертке столбцы (и/или строки) могут состоять не более чем из двух сегментов, а внешние сигналы могут быть сняты с противоположных сторон матричной структуры (сверху

и снизу) или на одной строке могут быть реализованы две конъюнкции (соответствующие сигналы снимаются слева и справа). При многократной свертке число сегментов (разрывов) свернутых столбцов и/или строк не ограничивается.

Таблица
Оценки площади структурных блоков топологического плана РМОП-схемы (см. рис. 2)

Номер блока	Наименование блока	Площадь ячеек (у.е.п.)			
		постоянных	добавляемых	всех добавляемых	общая
I	Матрица И	1	–	–	$2 \cdot n \cdot k$
II	Входные буферы	29	5	$5 \cdot d$	$(29 + 5 \cdot d) \cdot n$
III	Подвод «земли» к строкам	3	–	–	$3 \cdot k$
IV	Переходные ячейки	0,8	–	–	$0,8 \cdot k$
V	Проводные дизъюнкции	0,8	–	–	$0,8 \cdot k$
VI	Выходные нагрузки строк матрицы И	3	–	–	$3 \cdot k$
VII	Съем выходных сигналов	14	–	–	$14 \cdot k$
VIII	Подвод «земли» к входным буферам	41	7	$7 \cdot d$	$41 + 7 \cdot d$
IX	Подвод «питания» и синхросигнала к входным буферам	73	6	$6 \cdot d$	$73 + 6 \cdot d$
X	Нижнее обрамление схемы	53	5	$5 \cdot n$	$53 + 5 \cdot n$
XI	Подвод «земли» к нижним входным буферам	41	7	$7 \cdot d$	$41 + 7 \cdot d$
XII	Нижние входные буферы	29	5	$5 \cdot d$	$(29 + 5 \cdot d) \cdot n'$
XIII	Подвод «питания» и синхросигнала к нижним входным буферам	41	5	$5 \cdot d$	$41 + 5 \cdot d$
XIV	Нижнее обрамление схемы	46	–	–	46

Структура топологического плана РМОП-схемы (см. рис. 2, а) не допускает свертку строк и многократную свертку столбцов матрицы И. Соответственно для топологического уплотнения матрицы И может быть использована только простая столбцовая свертка, которая обеспечивает сокращение площади РМОП-схемы до 50 % [4].

Столбцовая свертка основана на поиске такого переупорядочения строк матрицы И, которое позволяет совместить (свернуть) некоторые ее столбцы. С точки зрения схемотехнической и топологической реализации такое преобразование достигается посредством разрыва соединения между затворами nМОП-транзисторов в свертываемом столбце. После свертки столбец будет состоять из двух сегментов, разделенных специальной ячейкой разрыва (в слое поликремния), которая имеет такой же размер, как и основные ячейки матрицы И. При этом входные сигналы, соответствующие сегментам столбца, должны подаваться сверху и снизу матрицы И (см. рис. 2, б). В результате свертки на топологическом плане свернутой РМОП-схемы блок X заменится четырьмя новыми блоками XI–XIV. Блоки XI и XII аналогичны блокам VIII и II. Свернутая матрица И (блок I) будет включать ячейки разрыва, но число ее строк должно оставаться неизменным. Это означает, что ячейки разрыва должны замещать основные ячейки с замаскированными МОП-транзисторами (см. блок I на рис. 2, б) [9].

Рассматриваемая топологическая реализация РМОП-схемы накладывает ряд довольно жестких ограничений на вид свернутой РМОП-схемы. Перечислим особенности топологической реализации РМОП-схемы, которые необходимо учитывать при решении задачи ее топологической оптимизации методом свертки:

(S_3, S_4) . Любое множество попарно не пересекающихся (по столбцам) упорядоченных свертываемых пар столбцов называется свертываемым множеством [6]. Это множество порождает трехблочное разбиение (C^u, C^l, C^r) на множестве $C(\mathbf{B})$ столбцов матрицы \mathbf{B} : столбцы из C^u и C^l задают собой верхние и нижние сегменты свертываемых пар, столбцы из C^r – все остальные столбцы.

Свертываемое множество реализуемо (порождает свертку), если оно порождает отношение частичного порядка на множестве $R(\mathbf{B})$ строк матрицы \mathbf{B} . Любое доопределение (если никаких ограничений на тип свертки не накладывается) этого отношения частичного порядка порождает отношение полного порядка на множестве строк матрицы \mathbf{B} , а оно, в свою очередь, однозначно определяет вид свернутой матрицы \mathbf{B} и соответственно топологию свернутой РМОП-схемы.

Задача столбцовой свертки двумерной матричной структуры (без ограничений на порядок следования строк) сводится к поиску реализуемого свертываемого множества наибольшей мощности. Проанализируем, как можно учесть при свертке особенности рассматриваемой матричной реализации РМОП-схемы, перечисленные в разд. 4, и каким требованиям должно удовлетворять решение задачи свертки:

1. Столбцы матрицы \mathbf{B} , соответствующие x_k и \bar{x}_k , не могут принадлежать разным множествам C^u и C^l трехблочного разбиения (C^u, C^l, C^r) , порождаемого свертываемым множеством, т. е. если столбец, соответствующий x_k^σ (здесь $\sigma \in \{0, 1\}$, $x_k^1 = x_k$, $x_k^0 = \bar{x}_k$), является первым в некоторой свертываемой паре $\langle c_k^B, c_l^B \rangle$ свертываемого множества, то столбец, соответствующий x_k^σ , не может быть вторым в некоторой другой паре $\langle c_i^B, c_k^B \rangle$ свертываемого множества.

2. Если столбец, соответствующий x_i^σ , свертывается со столбцом, соответствующим x_j^ρ , то столбец, соответствующий x_i^σ , должен свертываться со столбцом, соответствующим x_j^ρ (для всех комбинаций значений σ и ρ).

3. Свертываемое множество реализуемо, если порождаемое им отношение частичного порядка на множестве $R(\mathbf{B})$ не противоречит разбиению строк матрицы \mathbf{B} на секции, т. е. если согласно этому отношению частичного порядка некоторая строка $r_p^B \in S_i$ из i -й секции предшествует строке $r_q^B \in S_j$ из j -й секции ($i \neq j$), то все остальные строки из S_j не должны предшествовать ни одной строке из S_i .

4. Порождаемое свертываемым множеством отношение частичного порядка на множестве строк следует так доопределять до полного порядка, чтобы столбцы любой свертываемой пары не имели единичных значений на пересечении с двумя следующими друг за другом строками, которые должны быть разделены разрывом.

6. Модификация метода двудольной свертки РМОП-схемы

Рассмотрим задачу двудольной свертки РМОП-схем, исследованную в работе [10], для РМОП-схем, топология которых предъявляет единственное требование к типу возможной свертки – сформулированное выше требование 3. Покажем, как можно модифицировать предложенный в [10] метод для РМОП-схем описанной выше топологической реализации.

Двудольная свертка является частным случаем простой свертки, в которой разрывы всех вертикальных шин при столбцовой свертке находятся на одном уровне. Для этого типа свертки любые два столбца матрицы \mathbf{B} , взятые по одному из множеств C^u и C^l (порождаемых реализуемым свертываемым множеством), не должны пересекаться, так как все разрывы могут быть расположены между одними и теми же двумя строками. Отсюда вытекает необходимое и достаточное условие, чтобы пара равномощных множеств C^u, C^l столбцов порождала двудольную свертку: любой столбец из C^u должен быть построчно совместим с любым столбцом из C^l , и наоборот [5, 6]. Пара равномощных множеств столбцов $C^u, C^l \subseteq C(\mathbf{B})$, удовлетворяющая этому условию, называется *двудольно свертываемой парой множеств столбцов матричной структуры*. Мощность t этих множеств определяет размер двудольно свертываемой пары множеств и соответственно размер свернутой матричной структуры.

Описанный в [10] метод исходит из секционированной матрицы \mathbf{B} и матриц \mathbf{B}_S^c и \mathbf{B}_S^r (5). В рассматриваемом случае требование 1 к виду свертки будет учтено, если пары столбцов, соответствующие любым парам x_k и \bar{x}_k , будут принадлежать одной и той же доле (C^u или C^l)

двудольной свертки. Для того чтобы учесть это требование, объединим пары одноименных столбцов (x_k и \bar{x}_k) в матрицах \mathbf{B} и \mathbf{B}_S^c :

$$\mathbf{B} = \begin{array}{cccccc} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & r_1 & S_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & r_2 & \\ \hline 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & r_3 & S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & r_4 & \\ \hline 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & r_5 & S_3 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & r_6 & \\ \hline 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & r_7 & \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & r_8 & S_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & r_9 & \end{array} ; \quad \mathbf{B}_S^c = \begin{array}{cccccc} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & S_1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & S_2 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & S_3 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & S_4 \end{array} .$$

Требование 2 для случая двудольной свертки выполняется автоматически. Для учета требования 3 в методе [10] наряду с отношением совместимости по строкам и секциям на множестве столбцов матрицы \mathbf{B} находится отношение q -квазисовместимости по секциям. Столбцы c_k^B и c_l^B q -квазисовместимы, если они пересекаются только по q -й секции: $S(c_k^B) \cap S(c_l^B) = S_q$. В работе [10] показано, что пара столбцов c_k^B и c_l^B является свертываемой, если эти столбцы совместимы по строкам и совместимы или q -квазисовместимы по секциям. При выполнении этих условий пара столбцов называется совместимой или q -совместимой. В нашем случае отношения T_r совместимости по строкам, T_S q -квазисовместимости по секциям и T^* q -совместимости столбцов матрицы \mathbf{B} задаются следующими матрицами:

$$\mathbf{T}_r = \begin{array}{cccccc} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & x_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & x_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & x_3 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & x_4 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & x_5 \end{array} ; \quad \mathbf{T}_S = \mathbf{T}^* = \begin{array}{cccccc} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & \\ 0 & 0 & 0 & * & 2 & x_1 \\ 0 & 0 & 0 & * & 2 & x_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & x_3 \\ * & * & 1 & 0 & 0 & x_4 \\ 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & x_5 \end{array} .$$

Элементы матриц \mathbf{T}_S и \mathbf{T}^* отмечаются символом $*$, если соответствующая пара столбцов совместима по секциям; 0, если не совместима, и числом q , если пара столбцов секционно q -квазисовместима.

В работе [10] доказано, что пара равномошных множеств столбцов $C^u, C^l \subseteq C(\mathbf{B})$ является двудольно свертываемой парой множеств столбцов РМОП-структуры, если и только если найдется такое q , что любые два столбца, взятые по одному из множеств C^u и C^l , либо совместимы, либо q -совместимы. При топологической реализации такой двудольно свертываемой пары множеств столбцов разрывы всех столбцов будут находиться в пределах q -й секции. В матричном виде это утверждение формулируется [10] следующим образом: пара равномошных множеств столбцов $C^u, C^l \subseteq C(\mathbf{B})$ является двудольно свертываемой парой множеств столбцов РМОП-структуры, если и только если найдется такое q , что все элементы минора матрицы \mathbf{T}^* q -совместимости, порождаемого этой парой, имеют значение «*» или q . Анализ вышеприведенной матрицы \mathbf{T}^* q -совместимости показывает, что для нашего примера существует единственный максимальный минор $\{c_4^{T^*}, c_5^{T^*}\}, \{r_1^{T^*}, r_2^{T^*}\}$ матрицы \mathbf{T}^* , удовлетворяющий этому условию. Он порождает двудольно свертываемую пару множеств столбцов матрицы \mathbf{B} : $\{x_4, \bar{x}_4, x_5, \bar{x}_5\}, \{x_1, \bar{x}_1, x_2, \bar{x}_2\}$.

Требование 4, налагаемое на вид свертки топологической реализацией РМОП-схемы, учитывается при назначении входов на столбцы свернутой структуры и при доопределении частичного порядка на множестве строк до полного. В рассматриваемом случае допустимо назначить столбцам структуры входные сигналы сверху и снизу, например, в следующем порядке: $\{x_4, \bar{x}_4, x_5, \bar{x}_5, x_3, \bar{x}_3\}$ и $\{x_2, \bar{x}_2, x_1, \bar{x}_1\}$, переупорядочив строки и секции: $\{r_1, r_2, r_8, r_9, r_4, r_3, r_5, r_6, r_7\}$ и $\{S_1, S_4, S_2, S_3\}$.

Матрица \mathbf{B}^* , которая описывает РМОП-схему (см. рис. 1), свернутую соответственно найденному решению, приведена на структуре топологического плана (см. рис. 2, б).

7. Оценка эффективности свертки РМОП-схемы

Целью свертки РМОП-схемы является сокращение занимаемой ею площади кристалла. Оценим количественно (в у.е.п.) изменение площади при свертке двух пар столбцов $\langle c_i, c_j \rangle$ и $\langle c_{i+1}, c_{j+\rho} \rangle$ (где i нечетно; $\rho = 1$, если j нечетно, иначе $\rho = -1$). В результате свертки число столбцов в матрице И уменьшается на 2, соответственно экономия площади кристалла на размещения матрицы И составляет $\Delta S^- = 2k$ у.е.п. Одновременно требуется дополнительная площадь для блоков XI, XIII, XIV (рис. 4) при организации подвода сигналов одной переменной снизу матрицы И (см. таблицу): $\Delta S^+ = 68 + 12d$ у.е.п. Проведение свертки РМОП-схемы целесообразно, если она сокращает площадь кристалла, т. е. должно выполняться условие

$$\Delta S^- > \Delta S^+ \quad (\text{т. е. } k > 34 + 6d). \tag{6}$$

В частности, при минимальной входной нагрузке ($d = 0$) свертка одной пары столбцов РМОП-схемы целесообразна, если число строк матрицы И $k > 34$, а при максимальной входной нагрузке ($d = 3$), если $k > 52$.

Рассмотрим общий случай, когда сворачивается $2p$ столбцов матрицы И. Соответственно часть входных сигналов (соответствующих p входным переменным) подается снизу матрицы И. Условие (6) принимает вид

$$2p \cdot k > 72 + 12d - 5p.$$

Следовательно, при минимальной входной нагрузке ($d = 0$) уменьшение площади РМОП-схемы, достигнутое в результате свертки $2p$ столбцов, составит $k \geq 36/p - 2$.

Очевидно, что чем больше строк в матрице И и чем большее число столбцов сворачивается, тем больше эффект от свертки в РМОП-схеме. Рис. 4 позволяет визуально оценить эффект от свертывания четырех пар столбцов матрицы И (двух переменных).

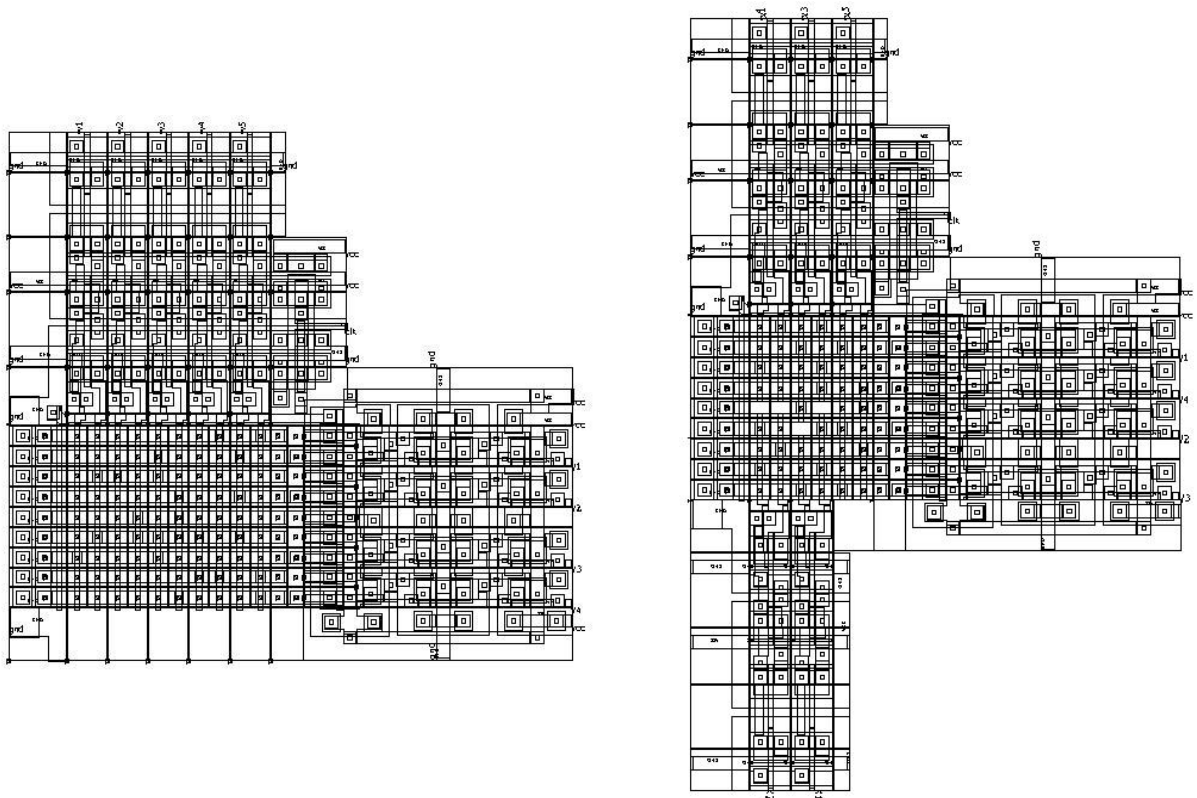


Рис. 4. Примеры послыной топологии исходной и свернутой РМОП-схем ($n=10, k=16, m=3, p=2$)

Заключение

В настоящей работе проведен анализ особенностей структурной организации топологического плана одного класса синхронных РМОП-схем, выполненных по КМОП-технологии, и ограничений на топологически реализуемые способы оптимизации площади РМОП-схем методом свертки. Предложен метод двудольной свертки РМОП-схем, учитывающий топологические ограничения их реализации на кристалле СБИС. Получены оценки площади РМОП-схемы в зависимости от ее параметров (числа внешних полюсов, функциональной сложности), а также оценки эффективности топологической реализации свернутых РМОП-схем.

Список литературы

1. Ульман, Дж. Вычислительные аспекты СБИС / Дж. Ульман. – М. : Радио и связь, 1990. – 480 с.
2. Бибило, П.Н. Кремниевая компиляция заказных СБИС / П.Н. Бибило. – Минск : Ин-т техн. кибернетики АН Беларуси, 1996. – 268 с.
3. Рабаи, Ж.М. Цифровые интегральные схемы ; пер. с англ. / Ж.М. Рабаи, А. Чандракасан, Б. Николич. – 2-е изд. – М. : Изд. дом «Вильямс», 2007. – 912 с.
4. Hatchel, G. An algorithm for optimal PLA folding / G. Hatchel, A. Newton, A. Sangiovanni-Vincentelli // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – 1982. – Vol. CAD-1, № 2. – P. 63–76.
5. DeMicheli, G. Multiple constrained folding of Programmable Logic Arrays: theory and applications / G. DeMicheli, A. Sangiovanni-Vincentelli // IEEE Trans. on Computer-Aided Design. – 1983. – Vol. CAD-2, № 3. – P. 151–167.
6. Черемисинова, Л.Д. Минимизация площади регулярных матричных структур заказных СБИС / Л.Д. Черемисинова // Информатика. – 2004. – № 1. – С. 121–131.
7. Авдеев, Н.А. Нахождение задержек регулярных схем с последовательным соединением транзисторов / Н.А. Авдеев, П.Н. Бибило // Информатика. – 2008. – № 2(18). – С. 69–80.
8. Cheremisinova, L.D. Simple folding of array-based VLSI structures / L.D. Cheremisinova // The 6-th Intern. Workchop on Boolean problems, Freiberg (Sachsen), Sept. 19–20, 2004. – Freiberg (Sachsen), 2004. – P. 245–250.
9. Логинова, И.П. Модель, отображающая технологическую реализацию свертки в регулярных МОП-структурах / И.П. Логинова // Танаевские чтения : докл. Третьей науч. конф., 28 марта 2007 г., Минск. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2007. – С. 109–114.
10. Черемисинова, Л.Д. Топологическая оптимизация регулярных МОП-структур методом двудольной свертки / Л.Д. Черемисинова // Информатика. – 2008. – № 2(18). – С. 92–101.

Поступила 09.01.09

*Объединенный институт проблем
информатики НАН Беларуси,
Минск, Сурганова, 6
e-mail: cld@newman.bas-net.by,
log@newman.bas-net.by*

I.P. Loginova, L.D. Cheremisinova

**AREA MINIMIZATION OF REGULAR STRUCTURES
WITH CASCADE CONNECTION
OF MOS-TRANSISTORS ON TOPOLOGICAL LEVEL**

The problem under investigation is to reduce the area of the layout of one of the types of custom VLSI control logic based on regular structures with cascade connection of MOS-transistors (RMOS-structures) on topological level. The peculiarities of structural organization of RMOS-structure topology and its area optimization by means of folding are considered. Some restrictions imposed on the folding mode by the RMOS-structure topology are formulated. It is shown how these restrictions can be taken into account during RMOS-structure bipartite folding.