

УДК 621.38 : 519.87

С. А. Фролов

(Новосибирск)

**АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ТРАССИРОВКИ ШИН ПИТАНИЯ  
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ БИС**

Рассматривается простой алгоритм автоматической трассировки шин питания при проектировании БИС, основанный на рекурсивном делении графа, содержащего информацию о топологии схемы. Описаны методы оптимизации результатов трассировки и приведены сведения о программной реализации алгоритма.

**Введение.** Задача трассировки межсоединений ИС формулируется достаточно просто: определен некоторый набор топологических блоков (ячеек), их взаимное расположение, а также известен список входов (или портов) для каждого из этих блоков. Требуется построить топологию межсоединений так, чтобы все порты с одинаковыми именами оказались соединенными по возможности кратчайшими путями. Подобные комбинаторные задачи относятся к классу «трудных» в том смысле, что с ростом размерности задачи время, требуемое для ее точного решения, экспоненциально возрастает. Поэтому становится целесообразным использовать эвристические алгоритмы, не гарантирующие точное решение, но имеющие меньшую сложность и дающие вполне удовлетворительный результат для конкретного класса задач ИС. Нередко в программные пакеты, предназначенные для проектирования СБИС, встроено несколько программ трассировки с разными алгоритмами, и пользователь определяет сам, какой из алгоритмов использовать для трассировки конкретной схемы.

Что касается трассировки шин питания и земли, то эта задача несколько отличается от задачи трассировки сигнальных шин в СБИС ограничениями, которые чаще всего не учитываются при трассировке сигнальных шин. Шины питания проводятся в слое металлизации без переходов на слой поликремния или диффузии, иначе резко возросла бы рассеиваемая кристаллом мощность, так как слой металла имеет удельное сопротивление, на несколько порядков меньшее, чем слой поликремния или диффузии. Если технология изготовления БИС допускает использование нескольких слоев металлизации, то один из них обычно полностью отводится для трассировки шин питания. Кроме того, проводник в зависимости от его геометрических размеров имеет вполне определенные ограничения на величину пропускаемого тока, при превышении которой проводник начинает разрушаться. Поэтому ширина шин питания выбирается в зависимости от нагрузки и определяется количеством транзисторов минимальных размеров, соединенных с этой шиной. Напротив, при автоматической трассировке сигнальных шин обычно используются два и более слоев (например, слой металла и поликремния), разрешены переходы между слоями и считается, что все проводники на каждом слое имеют одинаковую ширину.

Следовательно, разводка проводников питания может проводиться по специальному алгоритму, и, более того, если в одном слое металлизации мы допускаем трассировку и шин питания, и сигналов, то трассировка шин питания должна осуществляться перед трассировкой сигнальных шин в этом же слое.

1. Основной алгоритм. Предлагаемый алгоритм трассировки шин питания является эвристическим в том смысле, что он позволяет находить хорошее решение при проектировании БИС довольно распространенным, как нам кажется, методом. Имеется в виду следующее. При проектировании топологии иерархической схемы используются методы «снизу вверх» и «сверху вниз» [2]. При проектировании «снизу вверх» из отдельных транзисторов собираются ячейки регистра, сумматора и т. п. Затем эти ячейки объединяются во все более крупные блоки, пока не будет создана топология всей БИС. При использовании метода «сверху вниз» оценивается площадь и форма основных блоков (АЛУ, блоки управления, банки памяти и т. п.) и их взаимное расположение. Обычно эти методы используются практически одновременно. Следствием проектирования топологии методом «сверху вниз» является выраженность направления распространения сигналов ортогонально направлению проводников питания и сигналов синхронизации (подобных шинам питания в том смысле, что они также «пронизывают» весь кристалл; эти сигналы также желательно проводить в слое металлизации, так как задержка в распространении этих сигналов может привести к нарушению синхронизации в кристалле) (рис. 1). При проектировании «снизу вверх» многоуровневой схемы используется простое копирование топологии одного разряда требуемое количество раз. Результатом использования этих двух подходов может быть создание библиотеки блоков нижнего уровня с типичным расположением выводов подобно изображенному на рис. 2, причем универсальность применения этих блоков повышается, если порты питания выводятся на две противоположные стороны, или, другими словами, каждый порт питания на одной из сторон имеет электрическое соединение с портом питания на противоположной стороне [3]. Естественно также допустить, что в топологии могут быть использованы те же ячейки (см. рис. 2), но повернутые на 90°.

Утверждение А. Если для каждой такой ячейки, причем независимо от расположения портов питания (VDD) и портов земли (GND) этой ячейки, обеспечить подведение проводников питания и земли способом, показанным на рис. 3; затем все порты VDD каждой ячейки соединить с проводником питания VDD, проходящим вдоль одной из сторон этой ячейки; все порты GND соединить с проводником GND, проходящим вдоль противоположной стороны ячейки, то все порты VDD- и GND-ячеек окажутся подсоединенными.

Утверждение Б. Если какие-то из сторон ячейки не содержат портов питания, то соответствующий этой стороне проводник может быть удален из топологии в том лишь случае, если в результате этого действия не окажутся отсоединенными от питания порты других ячеек.

Рассмотрим алгоритм трассировки шин питания, удовлетворяющий утверждению А. Рассмотрим ячейку самого верхнего уровня иерархии, где будет виден лишь один блок и контактные площадки для внешних выводов БИС. Решение такой задачи может быть простым (рис. 3).

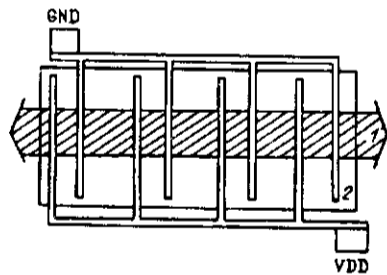


Рис. 1. Направление распространения шин питания и сигналов на топологии СБИС:

1 — направление распространения сигналов, 2 — топология БИС, VDD — шина питания, GND — шина земли

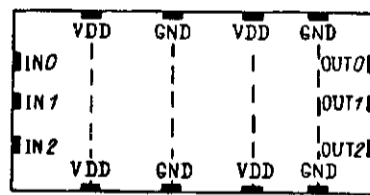


Рис. 2. Типичное расположение выводов для ячейки нижнего уровня иерархии:

черные прямоугольники — порты ячейки, IN0—2 — входные порты, OUT0—2 — выходные порты, VDD, GND — порты питания

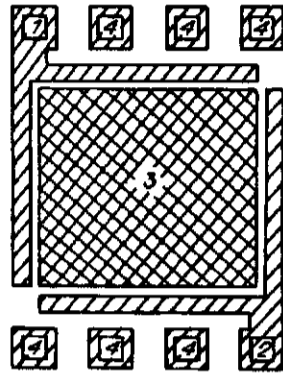


Рис. 3. Пример трассировки шин питания и земли для ячейки верхнего уровня иерархии:

1 — контактная площадка GND, 2 — контактная площадка VDD, 3 — ячейка верхнего уровня иерархии, 4 — контактные площадки сигналов БИС

Далее, пусть в результате предыдущего действия ячейка верхнего уровня окружена слева и сверху проводником VDD и справа и снизу проводником GND.

Затем, если ячейку верхнего уровня геометрически разделить на две части проведением вертикального (или горизонтального) разреза, то для каждой из двух половин выполнится утверждение А при проведении следующих действий.

А. Вдоль вертикального разреза проводятся два проводника, причем левый проводник соединяется внизу с проводником GND, а правый — вверх с проводником VDD (рис. 4). Соответственно, если разрез горизонтален, то из двух проводников вдоль линии разреза нижний проводник соединяется слева с проводником VDD, верхний — справа с проводником GND.

Б. Если такое разделение продолжить рекурсивно до тех пор, пока не будут достигнуты ячейки нижнего уровня иерархии (или примитивы), то каждая из примитивных ячеек будет окружена проводниками питания в соответствии с утверждением А (см. рис. 3).

В. С помощью такого алгоритма намечается лишь глобальная трассировка шин питания, так как еще не определены подсоединение портов VDD, GND каждой из ячеек и ширина проводников питания.

2. Учет технологических норм проектирования при трассировке шин питания. Для каждой конкретной технологии производства СБИС существует набор ограничений или правил, которые необходимо учитывать при разработке топологии. В этих правилах указывается минимальная ширина проводников в том или ином слое, минимальные расстояния между проводниками, размеры транзисторов и т. п. Чтобы результат автоматической трассировки был корректен с этой точки зрения, программа трассировки шин питания (даже вне зависимости от того, на основании какого алгоритма она была написана) должна настраиваться на те или иные нормы проектирования топологии, соответствующие выбранной технологии производства СБИС.

Так как трассировка шин питания проводится только в слое металлизации, то алгоритм трассировки должен учитывать следующие минимально допустимые в топологии СБИС геометрические размеры: расстояние между двумя металлическими проводниками, ширину металлического проводника, расстояние между металлическим проводником и границей ячейки.

В дальнейшем будет показано, как учитываются эти данные при трассировке шин питания.

3. Определение ширины проводников. Как было отмечено выше, ширина проводников питания выбирается в зависимости от нагрузки по току на эти проводники. Если порт питания на топологии СБИС изображать в символическом виде как прямоугольник, лежащий внутри ячейки и касающийся ее

Рис. 4. Решение задачи глобальной трассировки шин питания и земли после проведения вертикального разреза ячейки верхнего уровня иерархии:

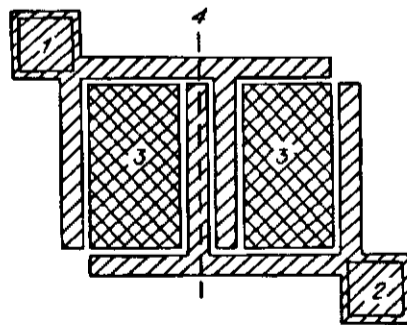
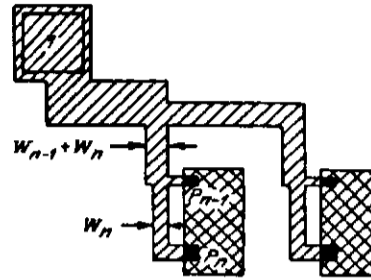


Рис. 4. Решение задачи глобальной трассировки шин питания и земли после проведения вертикального разреза ячейки верхнего уровня иерархии:

1, 2 — контактные площадки GND и VDD соответственно, 3 — разделенная пополам ячейка верхнего уровня иерархии, 4 — линия разреза

Рис. 5. Определение ширины проводников питания и земли:

1 — контактная площадка для проводника питания



границы, то «шириной порта» назовем длину той стороны, которой этот прямоугольник касается границы ячейки. Предположим, что ширина  $W$  порта питания ячейки выбрана, исходя из оптимальной нагрузки на этот порт. Тогда проводник, подключенный к  $N$  портам с ширинами  $W$ , должен будет иметь ширину  $N \times W$ . В описываемом алгоритме происходит «увеличение» ширины проводника питания по мере подсоединения к нему соответствующих портов. При выполнении процедуры определения ширины проводника питания рекурсивно находится последний порт  $P_n$  шириной  $W_n$ , подсоединенный к проводнику питания. Этому проводнику на промежутке до подсоединения следующего порта  $P_{n-1}$  присваивается ширина  $W_n$ ; после подсоединения порта  $P_{n-1}$  ширина проводника питания на промежутке  $[P_{n-1}, P_{n-2}]$  становится равной  $W_n + W_{n-1}$  и т. д. (рис. 5).

Отметим, что процедура определения ширины проводников контролирует минимальную ширину проводника в соответствии с технологическими нормами, приведенными в разд. 2. Проектировщик, пользующийся программой трассировки, может посчитать нужным сделать ширину порта питания меньше минимального размера, если нагрузка на этот порт невелика. При этом программа трассировки подводит к порту проводник минимальной ширины, а увеличение ширины проводника питания в последующем процессе произойдет на величину, равную ширине порта.

4. Оптимизация соединений. После определения глобального размещения шин питания, подсоединения портов VDD и GND и вычисления ширины проводников на всех участках проводится оптимизация топологии соединений. При такой оптимизации делается попытка уменьшить длину соединительных проводников и увеличить эффективное пространство для дальнейшей трассировки сигнальных шин. При выполнении процедуры оптимизации находят случаи, когда проводник питания  $A$  (рис. 6, а), проходящий вдоль стороны ячейки 1, находится на расстоянии  $W$ , превышающем минимально допустимое расстояние  $W_{\min}$ . Затем, во-первых, проводник  $A$  сдвигается в сторону ячейки 1, если к проводнику  $A$  подсоединены порты ячейки 1, во-вторых, уничтожается часть  $A_c$  проводника  $A$ , если порты питания других ячеек не оказываются отсоединенными. В результате:

— уменьшается общая длина проводника питания, так как уменьшается длина соединений между проводником  $A$  и портами ячейки 1;

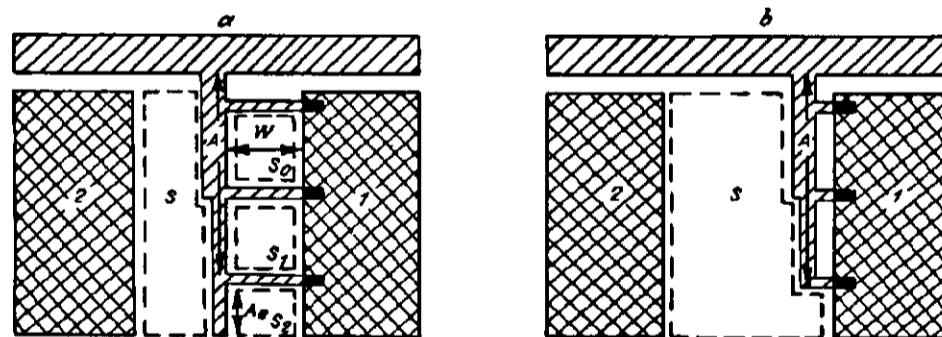


Рис. 6. Оптимизация трассировки шины питания:

1, 2 — ячейки;  $A$  — проводник питания; штриховой линией обозначены площади  $s, s_0, s_1, s_2$ , предназначенные для последующей трассировки сигнальных проводников;  $W$  — расстояние от проводника  $A$  до ячейки

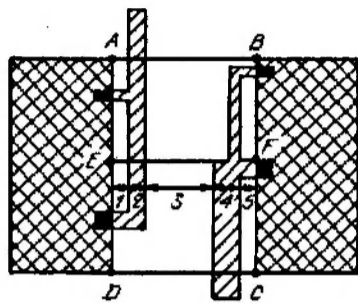


Рис. 7. Пример области  $ABCD$ , в которой проводится проверка технологических норм проектирования: прямоугольник  $ABCD$  — канал, прямоугольники  $ABFE$ ,  $EFCD$  — субканалы, 1, 5 — расстояние  $W_{mc}$ , 2 —  $W_{GND}$ , 4 —  $W_{VDD}$ , 3 —  $W$  ( $W \geq W_{mm}$ )

— увеличивается эффективная площадь  $S$  для последующей трассировки сигнальных шин. Имеется в виду то, что общую площадь  $S_{общ} = S + S_0 + S_1 + S_2$ , разделенную на части проводником питания (см. рис. 6, а), труднее использовать

для трассировки, нежели неразделенное пространство  $S$  на рис. 6, б.

5. Контроль выполнения технологических норм проектирования. В результате выполнения описанных выше процедур полностью определяется топология соединений шин питания. При этом в пространстве между двумя ячейками, как правило, расположены два проводника: один — шины питания, другой — земли. Может возникнуть ситуация, когда расстояние между этими проводниками меньше допустимого технологическими нормами. Исправить такую ситуацию можно лишь раздвижением граничащих ячеек, так как проводники питания после процедуры оптимизации уже лежат на минимальном расстоянии от ячеек. Описываемый ниже алгоритм позволяет выявлять такие ситуации.

1. Все пространство между ячейками делится на прямоугольные области — каналы — способом, подобным описанному в [4]. В каждом таком канале может быть не более двух проводников питания, расположенных параллельно друг другу.

2. Если эти проводники внутри канала имеют разную ширину, то канал разбивается на субканалы, внутри которых оба проводника имеют одинаковую ширину.

3. Так как проводники лежат на минимальном расстоянии от ячеек, достаточно для каждого канала проверить истинность неравенства

$$W_{кан} - 2W_{mc} - W_{GND} - W_{VDD} - w_{mm} > 0$$

(где  $W_{кан}$  — ширина канала (для рис. 7 это расстояние  $DC$ );  $W_{mc}$  — минимальное расстояние между ячейкой и проводником;  $W_{VDD}$  ( $W_{GND}$ ) — ширина проводника питания (земли) в субканале;  $W_{mm}$  — минимальное расстояние между проводниками в слое металлизации), чтобы убедиться в ненарушении норм проектирования.

Заключение. Описанный в данной статье алгоритм использует практически тот же метод, что и проектировщик топологии, проводящий трассировку шин питания вручную: топология БИС разбивается на все более мелкие блоки, к которым проводники питания подводятся так называемой «гребенкой» (см. рис. 1). Так как автоматическая трассировка проводится обычно в интерактивном режиме под контролем проектировщика промежуточных результатов работы программы, то простота и хорошая предсказуемость действий алгоритма трассировки позволяют быстро получать и оценивать результат работы программы. Другими словами, если программа трассировки «думает» примерно так же, как и человек, то результат их совместной работы может быть получен быстрее.

На основе описанных выше алгоритмов создана программа трассировки шин питания V-Cut. Программа V-Cut написана на языке программирования ADA в операционной системе VAX/VMS. В редактор топологии были дополнительно введены символические слои (т. е. слои, которые в дальнейшем при изготовлении БИС не используются) для построения портов питания VDD и GND. На рис. 8 приведен пример автоматической трассировки шин питания, причем каждый порт VDD (GND) на одной из сторон ячейки имеет электрическое соединение с портом VDD (GND) на противоположной стороне этой

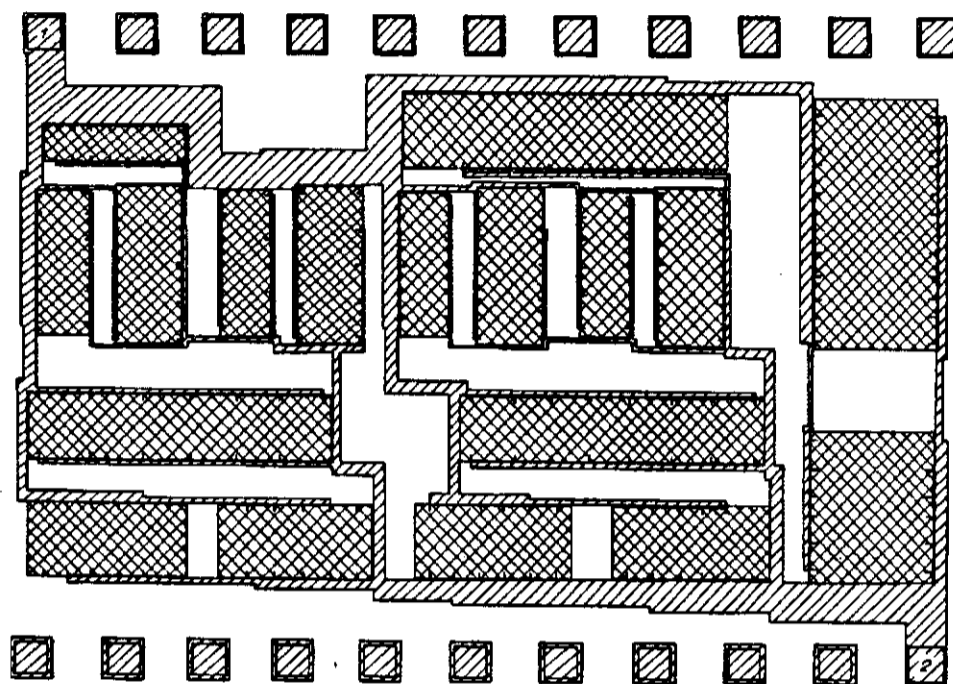


Рис. 8. Пример автоматической трассировки шин питания и земли, выполненной программой V-Cut:  
1, 2 — контактные площадки VDD и GND, сетка — ячейки, косая штриховка — проводник в слое металлизации

ячейки (см. рис. 2). Затраты процессорного времени ЭВМ VAX-8530 на трассировку такой топологической структуры составляют 1,93 с.

Отметим также, что если требуется проведение трассировки шин питания и земли не к одной, а к нескольким парам контактных площадок БИС, то программа V-Cut позволяет группировать ячейки и в каждой такой группе проводить трассировку отдельно. Пояснить действия алгоритма можно повторением предыдущих рассуждений разд. 1, с той лишь разницей, что вместо одной ячейки верхнего уровня иерархии будет несколько неперекрывающихся ячеек, для каждой из которых по отдельности будет найдено решение.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ватанабэ М., Асада К., Кани К., Оцуки Т. Проектирование СБИС. — М.: Мир, 1988.
2. Mead C., Conway L. Introduction to VLSI systems. — Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1980.
3. Иванов А. М., Лившиц З. А., Пичуев А. В. и др. Разработка заказной БИС специализированного арифметического устройства // Автометрия. — 1991. — № 1.
4. Advanced in CAD for VLSI. — V. 4: Layout Design and Verification / Ed. by Ohtsuki. — Amsterdam e. a.: Elsevier, 1986.

Поступило в редакцию 20 декабря 1992 г.