

В. А. Шахнов, Л. А. Зинченко,  
Е. В. Резчикова, А. Е. Аверьянин

## АЛГОРИТМЫ ТРАНСФОРМАЦИИ ТОПОЛОГИИ СУБМИКРОННЫХ СВЕРХБОЛЬШИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

*Описаны алгоритмы трансформации топологии субмикронных СБИС, ориентированные на применение для некоторых классов сложнофункциональных блоков, проектируемых для последующего производства по технологии двойного фотошаблона и удовлетворяющих условиям воспроизведения заданной топологии по технологии двойного фотошаблона. Показано, что для решения проблемы нахождения проектных решений необходимо использование приемов разрешения технических противоречий.*

**E-mail: shakhnov@mail.ru**

**Ключевые слова:** топология, СБИС, двойной фотошаблон.

Гордон Мур 40 лет назад сумел предугадать фантастические темпы развития всей отрасли электроники на несколько десятилетий вперед [1] и предсказать, что число транзисторов на чипе будет увеличиваться в 2 раза каждые 24 месяца. В настоящее время в соответствии с законом Мура продолжается масштабирование микросхем, последовательно осваиваются топологические нормы 90, 65, 45 нм. В соответствии с концепцией “Более Мур”, предложенной в документах ITRS [2] в 2007 г., представляется возможным появление еще нескольких поколений микросхем на основе традиционных подходов.

Однако с переходом к проектным нормам глубокого субмикрона (130 нм и далее) в конструировании интегральных схем возникли принципиально новые проблемы. Чем меньше критические размеры (Critical Dimensions (CD)) элементов интегральных схем, тем ближе предел, при котором начинают сказываться фундаментальные ограничения КМОП-технологии. При дальнейшей микроминиатюризации эффекты близости продуцируют вредные связи, снижающие точность воспроизводства геометрических фигур топологического слоя. По мнению ряда крупнейших аналитиков [3], предельные возможности полупроводниковых технологий будут исчерпаны, когда топологическая (проектная) норма микросхем перешагнет границу 20 нм и приблизится к отметке 18 нм.

Известно [2], что при проектировании и производстве интегральных схем важную роль играют процессы литографии. При достижении физических пределов литографического процесса затраты на совершенствование интегральных схем экспоненциально возрастают. Поэтому производители интегральных схем пытаются всеми способами

использовать возможные ресурсы для повышения разрешающей способности проекционной оптической литографии с помощью таких инноваций, как, например, фазосдвигающие фотошаблоны и внеосевое освещение [2]. Среди множества различных подходов в документах ITRS [2] (рис. 1) отражены следующие основные направления дальнейшего развития литографии: литография жестким ультрафиолетом (EUV); методики двойного экспонирования (double exposure), к которым и относится экспонирование с двойным фотошаблоном.

Литография EUV относится к обычной оптической литографии. Ее отличительными особенностями являются использование излучения с длиной волны 11...14 нм и отражательных оптики и фотошаблонов. Однако сложная зеркальная оптика и прецизионная технология изготовления фотошаблонов делает такой подход исключительно дорогостоящим. В связи с этим внимание исследователей сосредоточивается на разработке литографических процессов, основанных на иных физических принципах.

В последние годы технология двойного фотошаблона привлекает внимание многих исследователей. Это объясняется тем, что переход на двухуровневые фотошаблоны позволяет снизить влияние эффектов близости и повысить выход годных СБИС без радикального усложнения технологии их производства.

Однако важнейшая для технологии двойного фотошаблона процедура декомпозиции топологии на две подчасти не является тривиальной и требует оценки всех возможных альтернативных решений с учетом технологических ограничений. Выполнить эту процедуру вручную весьма сложно. В связи с этим переход на технологию двойного фотошаблона требует широкого использования систем автоматизированного проектирования. В настоящее время такое математическое и соответствующее ему программное обеспечение, позволяющие проектировщику выполнить необходимую декомпозицию на топологическом уровне, находятся в стадии разработки. Указанные проблемы еще более усложняются при проектировании современных устройств, к которым, в частности, относятся системы на кристалле [4].

В соответствии с концепцией “Боле Мур” разработка систем на кристалле (System-on-Chip (SoC)) является одним из наиболее перспективных направлений дальнейшего развития электроники. Современная методология проектирования SoC базируется на многократном использовании сложнофункциональных блоков (Intellectual Property блоков, IP-блоков) [4]. При этом стоимость сложнофункционального блока в среднем в несколько раз превышает стоимость однократно используемого блока. В связи с этим при переходе на технологию двойного фотошаблона целесообразно максимально использовать существующие сложнофункциональные блоки. Для решения этой проб-

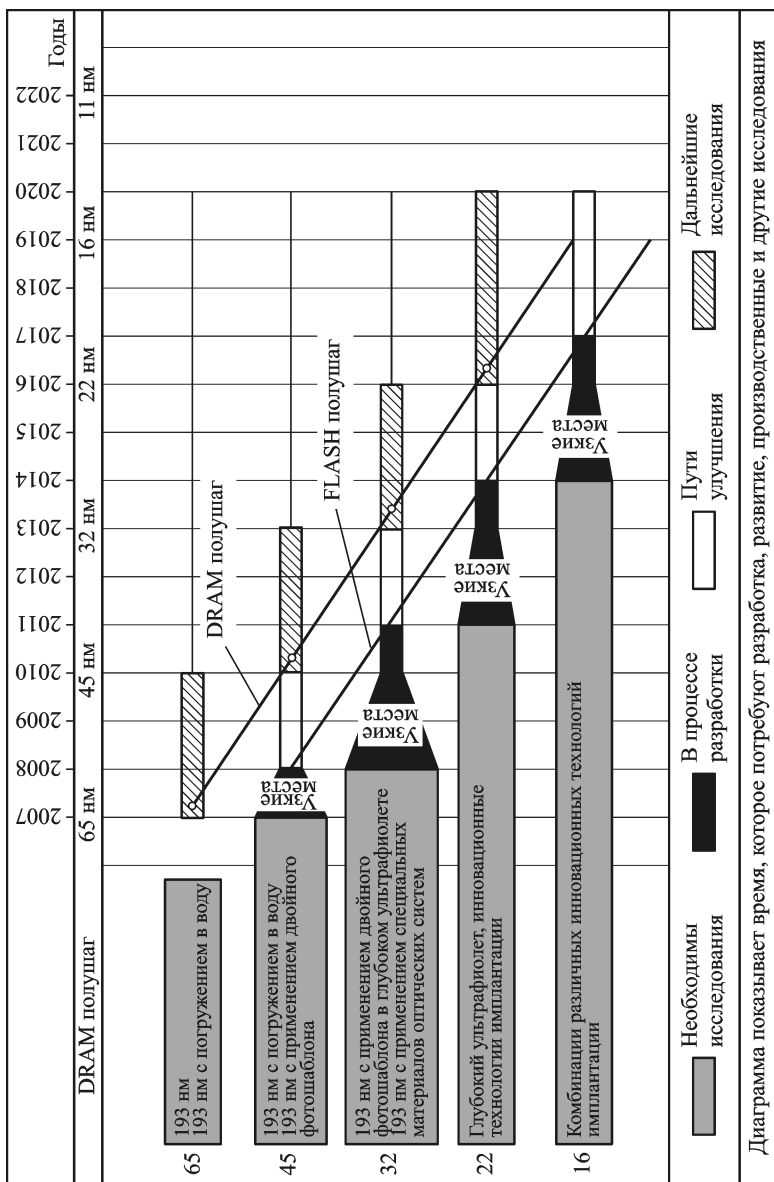


Рис. 1. Тенденции перехода на перспективные технологии производства СБИС [5]

лемы может быть использовано специальное математическое и программное обеспечение, позволяющее трансформировать топологию сложнофункциональных блоков таким образом, чтобы были выполнены заданные конструкторско-технологические ограничения.

Одним из наиболее сложных этапов при решении указанной задачи является построение графовых моделей, которое позволяет формализовать процедуры поиска различных альтернативных вариантов решения.

В настоящей работе рассматриваются нетривиальные перспективные подходы к автоматизации задач трансформации топологии на основе графовых моделей для технологии двойного фотошаблона, ориентированные на применение для сложнофункциональных блоков.

**Влияние особенностей технологии двойного фотошаблона на модели топологии СБИС.** Основная идея технологии двойного фотошаблона заключается в последовательном применении двух фотошаблонов во время экспонирования фоторезиста для получения рисунка с размерами элементов, недостижимыми с помощью традиционных методов оптической литографии. Выполнив эту технологическую операцию дважды — по одному разу для каждого фотошаблона — можно получить такое же плотное размещение элементов на поверхности полупроводниковой пластины, как было на исходном фотошаблоне. В ситуации возможной задержки или даже отказа от перехода на литографию EUV ведущие компании-поставщики литографического оборудования пересматривают свои планы, выдвигая на первый план для 32- и 22-нм технологий установки 193-нм иммерсионной литографии с двойным экспонированием рисунка.

В связи с началом широкого промышленного использования технологии двойного шаблона необходим переход к интегральному и синергетическому развитию литографии и систем автоматизации проектирования. Это влечет за собой значительные изменения в различных компонентах САПР, в частности в моделях топологии СБИС.

Традиционно информация о топологии СБИС хранится в файле, имеющем специальный формат. Наиболее распространенным является формат представления топологической информации GDSII [5]. Этот формат файлов в настоящее время является ведущим индустриальным стандартом для представления информации о топологии интегральных схем. Он также используется не только для представления информации, но и при последующей ее обработке в различных САПР СБИС.

Формат GDSII описывает плоские геометрические формы, текстовые поля и другую информацию в иерархической структуре. Каждая структура содержит следующие элементы: граница/многоугольник, траектория/полилиния, текст, структурные ограничения, массивы пе-

реквестных взаимосвязей. Элементы сконпонованы по слоям. Необходимо отметить, что файл в формате GDSII является кроссплатформенным.

Для хранения файлов в формате GDSII, описывающих сложно-функциональные блоки, необходимы значительные объемы памяти. В связи с этим проводятся исследования вопросов повышения эффективности их хранения и обработки [5, 6]. Различные методы оптимизации хранения и обработки файлов такого большого объема [5] требуют значительных вычислительных ресурсов, при этом усложняется код программы и ее разработка. Применение технологии двойного фотошаблона еще более ужесточает требования к эффективности хранения и обработки файлов в формате GDSII, описывающих сложно-функциональные блоки. Повышенные требования объясняются тем, что в этом случае необходимо учитывать взаимное влияние близко расположенных геометрических объектов.

В настоящей статье рассматривается следующая формулировка задачи трансформации топологии субмикронных СБИС для технологии двойного фотошаблона.

Для заданного множества геометрических объектов  $GeO = \{GeO_1, GeO_2, \dots, GeO_n\}$ , представляющих собой заданную топологию СБИС, необходимо найти такое решение, чтобы были выполнены следующие ограничения:

$$d_X(GeO_i, GeO_j) \geq d_{dr}(GeO_i, GeO_j), \quad (1)$$

$$d_Y(GeO_i, GeO_j) \geq d_{dr}(GeO_i, GeO_j), \quad (2)$$

$$d_X(GeO_i, GeO_j) \geq d_{dp}(GeO_i, GeO_j), \quad (3)$$

$$d_Y(GeO_i, GeO_j) \geq d_{dp}(GeO_i, GeO_j), \quad (4)$$

где  $d_X(GeO_i, GeO_j)$  и  $d_Y(GeO_i, GeO_j)$  — расстояния между геометрическими объектами  $GeO_i$  и  $GeO_j$  после трансформации топологии по осям абсцисс и ординат;  $d_{dr}(GeO_i, GeO_j)$  — минимально допустимые расстояния между геометрическими объектами  $GeO_i$  и  $GeO_j$  согласно конструкторско-технологическим ограничениям;  $d_{dp}(GeO_i, GeO_j)$  — минимально допустимое расстояние между геометрическими объектами, лежащими в одном слое, допускающее воспроизведение этих геометрических объектов в одном слое;  $i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n$ .

При этом полагается, что множество геометрических объектов  $GeO = \{GeO_1, GeO_2, \dots, GeO_n\}$  упорядочено по слоям, затем по координате  $X$  и далее по координате  $Y$  левого нижнего угла каждого геометрического объекта. В целях минимизации вычислительных затрат топологическая информация представляется в виде набора взаимосвязанных простых структур [7]. Такими структурами являются:

объект “Геометрический примитив”, в котором хранится информация о принадлежащих ему связях;

объект “Связь”, где хранится информация о принадлежности объекту “Геометрический примитив” и вершинах, которые инцидентны этой структуре;

объект “Вершина”, хранящий информацию о связях, представляющих собой отрезки, пересечением которых является данная вершина.

После введения этих структур данный процесс анализа топологии сводится к анализу пар различных элементов в целях определения критических значений и выделения их в выбранные модели.

Для решения поставленной задачи в части необходимых модификаций топологий субмикронных СБИС предлагается использовать совокупность графовых моделей. Это позволит обеспечить разделение информации о топологии, не разрушая ее логической целостности. Несмотря на то, что в этом случае требуются дополнительные вычислительные ресурсы для обработки и формирования графовых моделей, такая процедура решения задачи существенно более простая, чем работа со сжатым потоком данных или работа со всем файлом сразу.

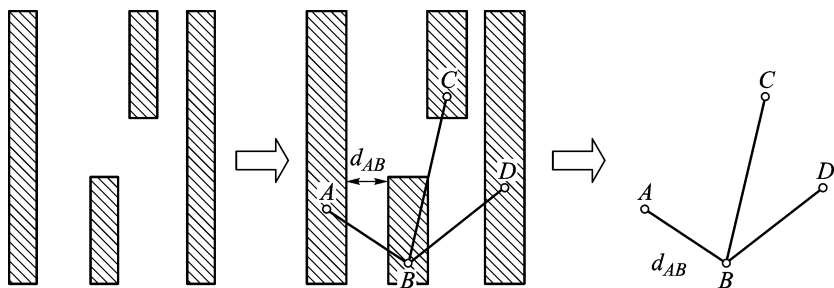
Для технологии двойного фотошаблона представляется целесообразным использование следующих двух основных графовых моделей. Понятие графа ограничений широко используется в САПР СБИС [5]. Граф ограничений используется для формализованного представления технологических ограничений. Однако использование только этой модели не позволяет учесть все особенности технологии двойного фотошаблона. В связи с этим используется также специализированная графовая модель для выявления противоречивых технических требований — граф противоречий, который предназначен для учета особенностей технологии двойного фотошаблона. Он позволяет выделить те фрагменты топологии, которые должны быть спроектированы в разных слоях для удовлетворения противоречивых требований, предъявляемых двумя разными нормативными системами (уменьшить расстояние между топологическими элементами и уменьшить искажения от оптических эффектов близости). Тем самым разрешается проблема качественного воспроизводства близко расположенных элементов.

**Алгоритмы построения графа ограничений.** В задачах трансформации топологии СБИС наиболее эффективные подходы базируются на применении графа ограничений [5].

Граф ограничений представляет собой направленный взвешенный граф

$$G_1 = (X_1, U_1), \quad (5)$$

где  $X_1 = \{x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}\}$  — множество вершин графа ограничений;  $n = |X_1|$  — число геометрических объектов в заданной топологии



**Рис. 2. Пример перехода от топологии и множества топологических ограничений к графу ограничений**

СБИС;  $U_1 = \{u_{11}, u_{12}, \dots, u_{1m1}\}$  — множество ребер в графе ограничений ( $|U_1| = m_1$ ).

Каждая вершина графа ограничений соответствует геометрическому объекту в топологии СБИС. Ребро в граф ограничений добавляется в том случае, если необходимо обеспечить выполнение условий (1) и/или (2) для геометрических объектов  $GeO_i$  и  $GeO_j$ . При этом вес ребра выбирается равным минимальному расстоянию между геометрическими объектами  $GeO_i$  и  $GeO_j$ , удовлетворяющему всем заданным конструкторско-технологическим ограничениям при условии выполнения ограничений по заданной схмотехнике.

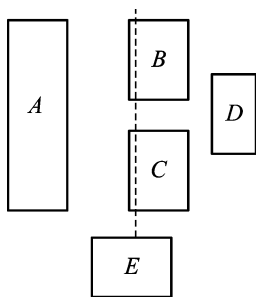
На рис. 2 приведен пример перехода от топологии и множества топологических ограничений к графу ограничений.

Построение графа ограничений требует больших вычислительных ресурсов, так как алгоритм его построения в наихудшем случае имеет временную сложность  $O(n^2)$  [5].

Однако построение графа ограничений для всех геометрических объектов, имеющих в топологии СБИС, не представляется целесообразным, так как конструкторско-технологические ограничения применяются только для близко расположенных геометрических объектов. В настоящее время наиболее эффективными подходами к построению

графа ограничений являются алгоритмы, базирующиеся на методе отбрасывания тени и методе сканирующей линии.

Метод сканирующей линии [5] базируется на построении линии по координате, для которой строится граф ограничений. На рис. 3 приведен пример построения сканирующей линии. Все геометрические объекты, которые пересекаются сканирующей линией, добавляются в список препятствий. Необходимо отметить, что метод сканирующей линии приводит к построению избыточных ребер в графе ограничений.



**Рис. 3. Пример применения метода сканирующей линии**

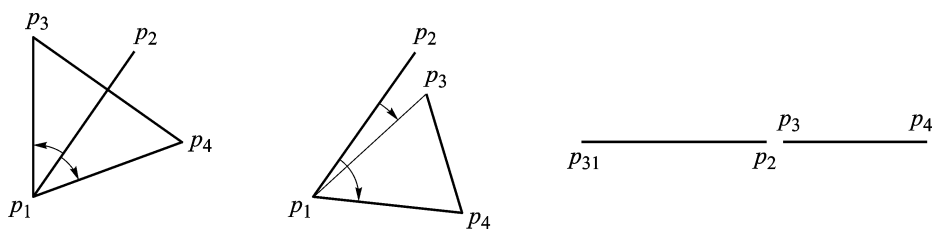


Рис. 4. Пример применения метода отбрасывания тени

Метод отбрасывания тени [5] базируется на построении лучей от некоторого геометрического объекта по координате, для которой строится граф ограничений. В случае если луч упирается в другой элемент, этот элемент добавляется в список препятствий. На рис. 4 приведен пример построения лучей и нахождения препятствий. На основе этого списка проводятся ребра графа между вершинами, соответствующими исходному геометрическому объекту и объекту-препятствию. Метод отбрасывания тени требует большого объема вычислений в связи с необходимостью перебора точек на некотором пространстве. С учетом этого для построения графа ограничений целесообразно использовать метод сканирующей линии.

**Алгоритм построения графа противоречий.** Для автоматизации проектирования топологии для технологии двойного фотошаблона, помимо графа ограничений, необходимо построить граф противоречий. Для этого необходимо выделить фрагменты топологии, расположенные на расстоянии менее заданного значения параметра  $d_{dp}(GeO_i, GeO_j)$ .

Для определения параметра  $d_{dp}(GeO_i, GeO_j)$  могут быть использованы различные подходы. Более точный подход базируется на компьютерном моделировании оптических эффектов и должен учитывать сложные модели литографии. Другой подход базируется на использовании некоторых эвристических правил. Он отличается меньшей точностью по сравнению с методом компьютерного моделирования процесса литографии, однако требует меньших вычислительных затрат. К сожалению, первый подход оказывается неэффективным при решении задачи трансформации топологии сложнофункциональных блоков в связи с очень большими временными затратами на моделирование оптических эффектов. В связи с этим в настоящей работе используется второй подход, базирующийся на использовании эвристических правил. Полагается, что параметр  $d_{dp}(GeO_i, GeO_j)$  задан эвристически после выполнения различных компьютерных экспериментов по моделированию процесса фотолитографии или экспериментов на соответствующем литографическом оборудовании.

Граф противоречий является обычным (невзвешенным) графом

$$G_2 = (X_2, U_2), \quad (6)$$



где  $X_2 = \{x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n}\}$  — множество вершин графа противоречий;  $|X_2| = n$  — число геометрических объектов в заданной топологии СБИС;  $U_2 = \{u_{21}, u_{22}, \dots, u_{2m_2}\}$  — множество ребер графа противоречий,  $|U_2| = m_2$  — число ребер в графе противоречий.

Построение графа противоречий выполняется следующим образом. Если расстояние между двумя геометрическими объектами  $GeO_i$  и  $GeO_j$  меньше значения  $d_{dp}(GeO_i, GeO_j)$ , то между вершинами графа, соответствующими этим объектам, добавляется ребро.

Следует отметить, что полученный граф противоречий представляет собой продукт анализа топологической информации в целях выделения близко расположенных геометрических объектов.

### **Иерархический алгоритм трансформации топологии СБИС.**

На основе предложенных графовых моделей согласно условиям (1)–(4) может быть выполнена требуемая трансформация топологии СБИС. Поставленную задачу можно решить на основе различных подходов. В настоящей статье предлагается использовать приемы разрешения противоречий [8].

Опыт применения приемов разрешения противоречий показывает, что, как правило, особенно для сложных проблем, задача не решается за одну итерацию. Каждое предложение по устранению очередного недостатка (расогласования связи между фрагментами топологии) может приводить к появлению другого нежелательного явления, и иногда нужно сделать до десятка итераций, прежде чем будет получено решение, которое удовлетворит разработчика. Важно, чтобы каждый последующий шаг приводил к менее значимым нежелательным эффектам. В итоге можно получить такое решение, в котором будет достигнуто максимальное для заданных условий соответствие функции и структуры.

После формулирования предметного противоречия (в рассматриваемом случае расстояние между смежными фрагментами топологии должно быть большим и не должно быть большим) необходимо провести его анализ, наметить методику разрешения и только после этого непосредственно осуществлять поиск самого решения. Стремление сразу искать ответ на поставленную задачу практически приводит к применению метода проб и ошибок, к тривиальным и стереотипным решениям в силу действия вектора психологической инерции. Например, уменьшить влияние эффектов близости можно путем увеличения расстояния между фрагментами топологии СБИС, что приводит к появлению другого нежелательного эффекта — увеличения геометрических размеров СБИС.

В работе приведено 40 различных приемов разрешения противоречий. Однако не все они могут быть применены для указанного

предметного противоречия. При дальнейшей микроминиатюризации СБИС, по всей видимости, могут быть применены следующие приемы разрешения противоречий [8]: дробление, динамизация, местное качество, обратная связь.

В настоящей статье для решения противоречий выбран прием дробления, так как он позволяет разбить исходную задачу на локальные подзадачи, восстановить структурно-функциональные связи и рекурсивно решить каждую отдельную задачу. Предложенный алгоритм приведен на рис. 5.

На первом этапе проверяется признак двухцветности графа противоречий на основе нижней границы оценки хроматического числа

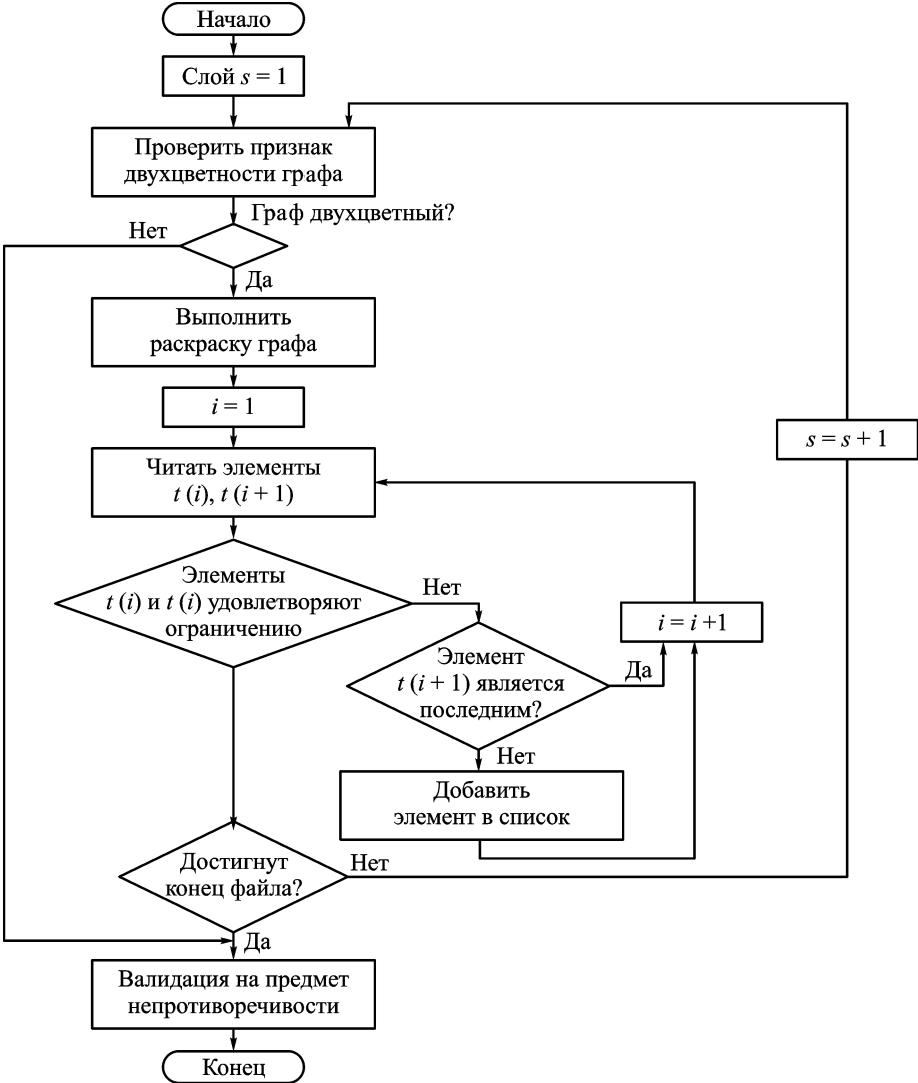


Рис. 5. Алгоритм трансформации топологии субмикронных СБИС

графа противоречий  $\chi(G)$  по формуле [9]

$$\chi(G) = \frac{n^2}{n^2 - 2m_2}. \quad (7)$$

При выполнении условия двухцветности графа применяется алгоритм раскраски графов. В противном случае исходная топология не может быть воспроизведена по технологии двойного фотошаблона.

Если граф двухцветен и задача раскраски графа завершена успешно, применяется алгоритм обхода элементов топологии в целях формирования списка геометрических элементов, подлежащих модификации. В этот список включаются элементы, которым был присвоен цвет 2 в ходе раскраски графов. На следующем этапе добавляется новый слой. Затем список  $GeOM = \{GeOM_1, GeOM_2, \dots, GeOM_k\}$  проверяется попарно на выполнение ограничений (3) и (4). Если условие выполняется, то текущий элемент из списка назначается в отдельный слой. На последнем этапе выполняется проверка взаимнооднозначного соответствия между элементами исходного множества геометрических объектов и элементами полученных множеств геометрических объектов. В случае корректности проверки на выходе топология модифицирована таким образом, что выполняются ограничения (1)–(4).

Предложенный алгоритм применим для проектирования топологии субмикронных СБИС, удовлетворяющих условиям воспроизведения по технологии двойного фотошаблона. В частности, к этому классу топологий относятся флэш-память на основе ячеек NAND, являющаяся наиболее подходящей основой для построения энергонезависимых устройств для хранения больших объемов информации.

**Заключение.** Рассмотрены возможные подходы к решению задачи трансформации топологии субмикронных СБИС для технологии двойного фотошаблона. Показано, что использование графовых моделей позволяет упростить процедуру модификации топологии за счет формирования и последующего использования графов ограничений и противоречий. Предложены алгоритмы построения графа противоречий и трансформации топологии СБИС. Указанные алгоритмы могут быть легко реализованы на основе языков высокого уровня.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 годы” (ГК № П2292).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Moore G. Cramming more components onto integrated circuits gordon moore // Electronics. – 1965. – № 8.

2. <http://www.itrs.net>
3. <http://www.isuppli.com>
4. Немудров В., Мартин Г. Системы на кристалле. Проектирование и развитие. – М.: Техносфера, 2004.
5. Shervani N. Algorithms for VLSI physical design automation. – Kluwer Academy Publisher, 1995.
6. Курейчик В. М., Зинченко Л. А., Тарасенко М. В. Применение символьных информационных технологий в задачах моделирования электронных устройств // Программные продукты и системы. – 2001. – № 2. – С. 13–17.
7. Аверьянихин А. Е. Разработка алгоритма трансформации маски для фотолитографии по технологии двойного фотошаблона // Сб. трудов Второй всеросс. шк.–семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению нанотехнологий. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009.
8. Ревенков А. В., Резчикова Е. В. Теория и практика решения технических задач. – М.: Форум, 2009.
9. Geller D., Stahl S. The chromatic number and other parameters of the lexicographic product // J. Combin. Theory Ser. B 19. – P. 87–95.

Статья поступила в редакцию 28.04.2010

Людмила Анатольевна Зинченко окончила в 1987 г. Таганрогский радиотехнический институт. Д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 197 научных работ в области информационных технологий, моделирования, САПР.

L.A. Zinchenko graduated from the Taganrog Radio-Engineering Institute in 1987. D. Sc. (Eng.), professor of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 197 publications in the field of information technologies, simulation, CAD-systems.

Елена Викентьевна Резчикова — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 30 научных работ и 9 изобретений в области конструктивной надежности МЭА и методики преподавания технических дисциплин

Ye.V. Rezchikova — Ph. D. (Eng.), assoc. professor of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 30 publications and 9 inventions in the field of constructive reliability of electronic apparatus and methodology of teaching technical disciplines.

Артур Евгеньевич Аверьянихин — математик второй категории МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 10 научных работ в области САПР наносистем.

A.Ye. Averyanikhin — 2nd class mathematician of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 10 publications in the field of CAD-systems for nanosystems.