АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБРАБОТКИ СТРУКТУРНОЙ ИНФОРМАЦИИ
(Вычислительные системы)
1981 год Выпуск 85

УДК 621.382.32

КОНТРОЛЬ ТОПОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

В.Г. Хрущёв

Основными требованиями, предъявляемыми к алгоритмам контроля топологии интегральных схем, используемым в автоматизированных системах проектирования интегральных схем, являются полнота и достоверность контроля: результаты контроля должны позволять без физической реализации схемы делать заключение о соответствии разработанной топологии интегральной схемы предъявляемым к ней требованиям, а именно о соответствии функций, реализуемых разработанной схемой, заданным функциям и о соответствии разработанной топологии требованиям, предъявляемым технологией изготовления.

В данной работе рассматривается один из удовлетворяющих указанным требованиям подходов к контролю топологии интегральных схем, выполненных методами планарной технологии. Рассматриваемый здесь метод контроля ориентирован на самый нижний уровень описания топологии интегральных схем - таблицу координат точек контуров топологии, в предположении, что разработанные процедуры могут быть легко преобразованы в случае использования языка описания более высокого уровня.

§1. Постановка задачи

Как известно, свойства планарных интегральных схем при заданной технологии изготовления определяются их топологией, т.е. разделенной на слои (обычно - по числу фотолитографий) совокупностью геометрических областей, определенным образом расположенных на плоскости (в поле кристалла интегральной схемы). Все функциональные, электрические и технологические характеристики таких схем определяются взаимным положением и размерами этих геометрических областей.

Зная физические принципы реализации элементов и используемую технологию, человек легко может выделить в описании топологии интегральной схемы отдельные фрагменты,реализующие компоненты принципиальной схемы спроектированного устройства, и проверить правильность этих реализаций, сравнивая их с некоторыми "эталонными" реализациями компонентов. Однако уже для схем средней степени интеграции этот процесс контроля "вручную" оказывается весьма трудоемким для человека и малоэффективным. Для нужд практики желательно сочетать полноту контроля "вручную" с эффективностью и достоверностью машинного контроля, т.е. построить машинный аналог процедуры контроля, осуществляемой человеком.

Процедуру контроля, используемую человеком, можно разделить на следующие основные этапы:

I. Выделение фрагментов описания топологии, реализующих функции компонентов принципиальной схемы. Каждый выделенный фрагмент определяется своей структурой, т.е. набором областей, которые он должен содержать, и их взаимным положением, обеспечивающим реализацию функционального назначения фрагмента.

2. Контроль тех метрических параметров конструкции интегральной схемы (размеров геометрических областей и расстояний между ними), которые существенны для обеспечения функционирования разработанной схемы и ее технологической реализуемости (обычно величины этих параметров описываются набором технологических ограничений, задающих предельные величины расстояний между границами геометрических областей).

3. Проверка топологии интегральной схемы на соответствие принципиальной схеме реализуемого устройства, для чего исследуется совокупность фрагментов, реализующих соединения принципиальной схемы.

Перечисленные этапы контроля естественно сохранить в качестве основных и в машинном методе контроля. Поэтому в данной работе решается задача построения алгоритма контроля топологии интегральных схем, позволяющего выделять в описании топологии фрагменты,соответствующие компонентам принципиальной схемы, контролировать правильность их реализации, восстанавливать принципиальную схему и проверять реализуемую ею функцию на соответствие заданной исходной функции.

Перейдем теперь к более точному описанию метода контроля.

§2. Представление геометрической конструкции

В [I] была описана модель топологии интегральной схемы, названная геометрической конструкцией интегральной схемы. Напомним некоторые введенные в [I] понятия.

Компонент d_μ геометрической конструкции был определен как (в общем случае-многосвязное) компактное подмножество точек основного множества $\mathcal{M}$ (соответствующего полю кристалла интегральной схемы). Для каждого компонента задан номер слоя; компоненты, принадлежащие одному слою, не пересекаются. Компонент геометрической конструкции обычно задается набором ограничивающих его контуров.

Под элементом e_ν геометрической конструкции подразумевался компонент связности общей части множеств, названных образующими множествами (или просто образующими) этого элемента. В число образующих могут входить компоненты геометрической конструкции и множества $\mathcal{M}_s = \mathcal{M} \setminus \bigcup_\lambda d_\lambda$, где $\{d_\lambda\}$ - совокупность всех компонентов геометрической конструкции с номером слоя s. Элемент геометрической конструкции описывается слоевой характеристикой - вектором, размерность которого равна числу слоев топологии. Значение s - составляющей $SL_s(e_\nu)$ слоевой характеристики $\overrightarrow{SL}(e_\nu)$ элемента e_ν равно "+I", если в число его образующих входит компонент геометрической конструкции с номером слоя s; оно равно "-I", если в число образующих входит множество $\mathcal{M}_s$; наконец, оно равно "0", если среди образующих этого элемента нет ни компонента с номером слоя s, ни множества $\mathcal{M}_s$ (в этом случае положение элемента e_ν по отношению к компонентам геометрической конструкции с номером слоя s безразлично). Компонент геометрической конструкции является частным случаем ее элемента; в дальнейшем через E^0 будем обозначать множество элементов геометрической конструкции, содержащее элементы 2-х видов:

а) элементы геометрической конструкции, совпадающие с компонентами геометрической конструкции - у этих элементов составляющая слоевой характеристики с номером, равным номеру слоя соответствующего компонента геометрической конструкции, имеет значение "+I", а остальные составляющие равны 0;

б) элементы геометрической конструкции, совпадающие с компонентами связности множеств $\mathcal{M}_s$ - все составляющие слоевой характеристики таких элементов равны 0, за исключением составляющей с номером s, которая равна "-I".

Границы элементов геометрической конструкции образуются граничными дугами, являющимися частями граничных контуров компонентов геометрической конструкции.

Элементы геометрической конструкции, границы которых имеют общую граничную дугу, назовем с м е ж н ы м и.

Пусть граница элемента геометрической конструкции e содержит дугу g, принадлежащую границе компонента геометрической конструкции d с номером слоя s. Тогда $SL_s(e) \neq 0$. Все элементы геометрической конструкции, смежные по дуге g, могут быть разбиты на две группы: ζ_g^+ и ζ_g^-. Группа ζ_g^+ содержит все элементы геометрической конструкции, s-составляющая слоевой характеристики которых равна +I, а группа ζ_g^- – все элементы с s-составляющей слоевой характеристики, равной -I. Два смежных по дуге g элемента геометрической конструкции будем называть с о с е д н и м и, если они не принадлежат одновременно группе ζ_g^+ или группе ζ_g^-.

Введем операцию $\vee$ о б ъ е д и н е н и я слоевых характеристик $\overrightarrow{SL}(e_\nu)$ и $\overrightarrow{SL}(e_\mu)$ элементов геометрической конструкции e_ν и e_μ в соответствии со следующей таблицей для s-составляющих слоевых характеристик, где знаком * помечены неопределенные значения:

$SL_s(e_\nu)$	-I	-I	-I	0	0	0	+I	+I	+I
$SL_s(e_\mu)$	-I	0	+I	-I	0	+I	-I	0	+I
$SL_s(e_\nu) \vee SL_s(e_\mu)$	-I	-I	*	-I	0	+I	*	+I	+I

Рассмотрим два набора элементов геометрической конструкции: $\{e_{q_1},\ldots,e_{q_n},e_\mu,e_\nu\}$ и $\{e_{q_1},\ldots,e_{q_n},e_\lambda,e_{\mu'},e_{\mu''},e_{\nu'},e_{\nu''}\}$. Будем говорить, что второй набор получен из первого применением о п е р а ц и и и з м е л ь ч е н и я и является и з м е л ь ч е н и е м первого набора, если выполняются следующие условия:

$$\left.\begin{array}{ll} \bar{e}_\mu \cap e_\nu \neq \emptyset; & \overrightarrow{SL}(e_\mu) \neq \overrightarrow{SL}(e_\nu); \\ e_\lambda \subset e_\mu \cap e_\nu; & \overrightarrow{SL}(e_\lambda)=\overrightarrow{SL}(e_\mu) \vee \overrightarrow{SL}(e_\nu); \\ e_{\mu'},e_{\mu''} \subset \overline{e_\mu \setminus e_\lambda}; & \overrightarrow{SL}(e_{\mu'})=\overrightarrow{SL}(e_{\mu''})=\overrightarrow{SL}(e_\mu); \\ e_{\nu'},e_{\nu''} \subset \overline{e_\nu \setminus e_\lambda}; & \overrightarrow{SL}(e_{\nu'})=\overrightarrow{SL}(e_{\nu''})=\overrightarrow{SL}(e_\nu), \end{array}\right\} \qquad (1)$$

где e_λ - компонент связности множества $\overline{-e_\mu \cap e_\nu}$; $e_{\mu'}$ и $e_{\mu''}$ - компоненты связности множества - разности $\overline{e_\mu \setminus e_\lambda}$; $e_{\nu'}$ и $e_{\nu''}$ - компоненты связности множества - разности $\overline{e_\nu \setminus e_\lambda}$; через $\bar{a}$ обозначено замыкание множества a; $e_{q_1},\ldots,e_{q_n}$ - элементы, остающиеся без изменения; каждый из элементов $e_{\mu'}$, $e_{\mu''}$, $e_{\nu'}$ и $e_{\nu''}$ может оказаться пустым множеством.

Операция измельчения "вырезает" из двух областей плоскости (элементов геометрической конструкции) общую часть, которая вместе с оставшимися частями этих областей образует новые элементы геометрической конструкции; остальные элементы при этом сохраняются без изменения.

Элемент e_λ, получающийся в результате измельчения элементов e_μ и e_ν, является соседним с элементами $e_{\mu'}$, $e_{\mu''}$, $e_{\nu'}$ и $e_{\nu''}$; объединение всех элементов, соседних по некоторой граничной дуге, дает множество смежных по этой дуге элементов. Мы будем считать, что этим правилом на множестве элементов геометрической конструкции задается отношение смежности.

Введем следующие обозначения: E - множество элементов геометрической конструкции; SL - совокупность слоевых характеристик элементов геометрической конструкции; Q - отношение смежности на множестве E.

Представление $\xi = \langle E, SL, Q\rangle$ геометрической конструкции $\mathcal{G}$ определим при помощи рекурсии.

1. $\xi^0 = \langle E^0, SL^0, Q^0\rangle$ является (исходным) представлением геометрической конструкции $\mathcal{G}$, где SL^0 - совокупность слоевых характеристик элементов множества E^0, а Q^0 - отношение смежности на множестве E^0.

2. $\xi'' = \langle E'', SL'', Q''\rangle$ является представлением геометрической конструкции $\mathcal{G}$, если существует ее представление $\xi' = \langle E', SL', Q'\rangle$ такое, что E'' может быть получено из E' применением к E' операции измельчения, а SL'' и Q'' - совокупность слоевых характеристик элементов множества E'' и отношение смежности на множестве E'', соответственно.

Граничную дугу g элемента e представления ξ будем называть внутренней дугой в представлении ξ, если для нее выполняется соотношение:

$$\bigvee_{e_\nu \in \xi_g^+} SL_{s'}(e_\nu) = \bigvee_{e_\mu \in \xi_g^-} SL_{s'}(e_\mu); \quad s' \neq s, \tag{2}$$

где s – номер слоя компонента геометрической конструкции, границе которого принадлежит дуга g .

Граничные дуги элементов представления ξ ,не являющиеся внутренними, образуют г р а н и ц у представления ξ и будут называться граничными дугами этого представления.

Отметим некоторые свойства представлений геометрической конструкции.

C1. Граница любого представления состоит из замкнутых контуров.

C2. В множестве представлений $\{\xi\}$ геометрической конструкции $\mathcal{Y}$ операция измельчения индуцирует частичный порядок с минимальным элементом, равным ξ^0 , и максимальным элементом ξ^m, для которого выполняется условие: каждая точка множества $\mathcal{M}$, не лежащая на границе какого-либо элемента геометрической конструкции из E^m, принадлежит точно одному элементу E^m .

Представление ξ'' с л е д у е т з а представлением ξ' , если оно может быть получено из ξ' применением (может быть,многократным) операции измельчения.

Будем говорить, что слоевая характеристика $\overrightarrow{SL}(e_\nu)$ элемента e_ν закрывает слоевую характеристику $\overrightarrow{SL}(e_\mu)$ элемента e_μ , если все составляющие слоевой характеристики $\overrightarrow{SL}(e_\mu)$, отличные от нуля, равны соответствующим составляющим слоевой характеристики $\overrightarrow{SL}(e_\nu)$.

C3. Для любого элемента e множества E' из некоторого представления ξ' в множестве E'' следующего за ним представления ξ'' найдется набор элементов (в частном случае состоящий из одного элемента), объединение которых совпадает с e , а слоевая характеристика любого элемента из этого набора закрывает слоевую характеристику элемента e .

§3. Покрытие геометрической конструкции

Пусть $\xi' = \langle E', SL', Q' \rangle$ и $\xi'' = \langle E'', SL'', Q'' \rangle$ – представления геометрических конструкций $\mathcal{Y}'$ и $\mathcal{Y}''$ соответственно.

В л о ж е н и е м h представления ξ'' в представление ξ' будем называть соответствие элементов представления ξ' элементам представления ξ'' , удовлетворяющее следующим условиям:

1. Каждому элементу e'' из E'' соответствует единственный элемент e' из E' и слоевые характеристики этих элементов совпадают (т.е., $\overrightarrow{SL}'(e') = \overrightarrow{SL}''(e'')$).

П. Элементы e'_μ и e'_ν множества E', соответствующие элементам e''_μ и e''_ν множества E'', являются смежными (соседними) в ξ' тогда и только тогда, когда элементы e''_μ и e''_ν смежные (соответственно соседние) в ξ''.

Элемент e' множества E', соответствующий элементу e'' множества E'', будем называть образом элемента e'' при вложении h и обозначать через $h_{\xi'}(e'')$.

Набор элементов множества E', являющихся образами элементов множества E'', вместе с совокупностью их слоевых характеристик и отношением смежности на этом наборе назовем образом представления ξ'' в представлении ξ' при вложении h и обозначим через $h_{\xi'}(\xi'')$.

Множество $\{\xi^i\}$ представлений геометрических конструкций $\{\mathcal{G}^i\}$ будем называть покрытием представления ξ геометрической конструкции $\mathcal{G}$, если между элементами множества E представления ξ и объединением всех элементов множества E^i представлений ξ^i вложения $h_i: \xi^i \to \xi$ устанавливают взаимно-однозначное соответствие.

Будем также говорить, что множество $\{\xi^i\}$ покрывает геометрическую конструкцию $\mathcal{G}$, если существует представление геометрической конструкции ξ, для которого множества $\{\xi^i\}$ являются покрытием.

На практике вопрос о существовании представления $\xi = \langle E, SL, Q \rangle$ геометрической конструкции $\mathcal{G}$ удобно решать в процессе покрытия ее представлениями из $\{\xi^i\}$. Для нахождения такого покрытия по заданному исходному представлению ξ^0 строятся промежуточные представления $\xi^{(n)}$ геометрической конструкции $\mathcal{G}$, включающие в себя образы представлений ξ^i, найденные на предыдущих этапах построения. При этом, чтобы найти образ элемента e представления ξ^i, в представлении $\xi^{(n)}$ выделяют подмножество имеющих непустое пересечение непокрытых элементов, слоевые характеристики которых в объединении дают слоевую характеристику элемента e (а каждая из них закрывается слоевой характеристикой элемента e). Применение к элементам этого подмножества операции измельчения дает в результате элемент представления $\xi^{(n+1)}$, который может быть образом элемента e. Если для всех элементов представления ξ^i найдены такие их образы, причем выполняется условие (П) из определения понятия вложения, то тем самым найден образ представления ξ^i в новом промежуточном представлении $\xi^{(n+1)}$. Процесс продолжается до тех пор, пока в промежуточном представлении не останется непокрытых элементов.

Отметим еще одно свойство:

С4. Граничные дуги, общие для образов представлений из $\{\xi^i\}$ при вложении их в представление ξ, должны удовлетворять соотношению (2).

Это свойство позволяет предсказывать значения слоевых характеристик элементов представлений, имеющих общую граничную дугу с элементами представления ξ^i.

§4. Восстановление принципиальной схемы

Принципиальной схемой интегральной схемы будем называть совокупность $S=\langle P,P^F,P^S,T\rangle$, где P - некоторое конечное множество (называемое множеством контактов), P^F и P^S - два разбиения множества P, а T - некоторая функция, заданная на множестве классов эквивалентности разбиения P^F. Разбиение $P^F=\{P_i\}$ описывает функциональные элементы принципиальной схемы: каждый класс P_i содержит все контакты одного функционального элемента схемы; разбиение $P^S=\{P_j\}$ задает соединительные элементы (связки) принципиальной схемы: каждый класс P_j содержит эквипотенциальные контакты схемы. Функция T ставит в соответствие каждому классу P_i разбиения P^F некоторую величину, определяющую тип функционального элемента схемы.

Будем в дальнейшем различать исходную $S=\langle P,P^F,P^S,T\rangle$ и восстановленную (по описанию топологии интегральной схемы) $\bar{S}=\langle \bar{P},\bar{P}^F,\bar{P}^S,\bar{T}\rangle$ принципиальные схемы.

Восстановленную принципиальную схему определим следующим образом.

Введем в рассмотрение некоторое множество геометрических конструкций $\mathcal{Y}=\{\mathcal{Y}_t\}$, $t=\overline{1,n}$, и пусть для каждой из них задано некоторое ее представление ξ_t. Будем называть каждое такое представление ξ_t эталонным фрагментом, а набор $\tilde{\xi}=\{\xi_t\}$ - набором эталонных фрагментов.

Эталонные фрагменты обеспечивают программу контроля информацией о физических принципах конструкции интегральной схемы. Из всех возможных наборов эталонных фрагментов в дальнейшем нас будут интересовать только такие наборы, фрагменты которых являются геометрическими конструкциями компонентов исходной принципиальной схемы, в число которых входят функциональные элементы принципиальной схемы (активные приборы, сопротивления, конденсаторы и т.п.), ее соединительные элементы (электрические проводники) и изолирующие элементы (обеспечивающие электрическое разделение компонентов схемы). В соответствии с этим будем различать три вида эталонных фрагментов: функциональные (ξ^E), соединительные (ξ^S) и изолирующие (ξ^I).

С каждым эталонным фрагментом ξ_t^F свяжем его тип T_t; будем считать, что тип функционального эталонного фрагмента совпадает с типом соответствующего ему функционального элемента принципиальной схемы (при этом тип $\bar{T}$ в восстановленной принципиальной схеме $\bar{S}$ будет сужением отображения T_t на множестве $\{\xi_t^F\}$. На границе функционального эталонного фрагмента выделим дуги, соответствующие контактам функционального элемента принципиальной схемы, и будем называть их *контактами фрагмента* ξ_t^F.

Рассмотрим теперь набор $\hat{\xi}=\{\xi_1^F,\xi_2^F,\xi_3^S,\xi_4^I,\xi_5^I,\dots\}$ эталонных фрагментов из $\tilde{\xi}$, среди которых могут быть одинаковые. Скажем, что *набор эталонных фрагментов* $\tilde{\xi}$ *покрывает* геометрическую конструкцию $\mathcal{Y}$ схемы, если ее покрывает набор $\hat{\xi}$.

Операция покрытия геометрической конструкции эталонными фрагментами соответствует выделению в топологии интегральной схемы фрагментов, реализующих компоненты принципиальной схемы.

Будем говорить, что принципиальная схема *восстановима* из геометрической конструкции $\mathcal{Y}$, если существует ее покрытие набором эталонных фрагментов $\tilde{\xi}$; в противном случае будем считать, что описание топологии интегральной схемы содержит ошибки, локализованные в тех областях геометрической конструкции, для которых в $\hat{\xi}$ не нашлось покрывающего эталонного фрагмента.

Образы $h_\xi\{\xi_t\}$ эталонных фрагментов из $\hat{\xi}$ при их вложении h в представление ξ соответствуют реализации компонентов принципиальной схемы; будем называть их *фрагментами представления*. Обозначим множество контактов фрагмента $h_\xi(\xi_t^F)$ через $\bar{P}_t^F$, тогда объединение $\bar{P}=\cup P_t^F$ по всем фрагментам, являющимся образами эталонных фрагментов из $\hat{\xi}$, будем называть *множеством контактов восстановленной принципиальной схемы*, а сами $\bar{P}_t^F$ – классами ее разбиения $\bar{P}^F$.

На границе каждого соединительного фрагмента $h_\xi(\xi^S)$ выделим дуги, совпадающие с граничными дугами смежных с ними функциональных фрагментов: эти дуги будем считать соответствующими контактам функциональных фрагментов и называть **контактами** соединительного фрагмента.

Поставим теперь в соответствие каждому соединительному фрагменту $h_\xi(\xi^S)$ вершину некоторого вспомогательного графа H^S, считая две вершины соединенными ребром тогда и только тогда, когда соответствующие фрагменты являются смежными (т.е. содержат по одному элементу какой-либо пары смежных элементов геометрической конструкции).

Связкой восстановленной принципиальной схемы назовем множество контактов, совпадающее с объединением множеств контактов всех фрагментов $\{h_\xi(\xi^S)\}$, соответствующих вершинам компонента связности графа H^S. Эти связки определяют классы эквивалентности разбиения $\overline{P}^S$.

§5. Контроль принципиальной схемы

Целью контроля принципиальной схемы является установление правильности реализуемой этой схемой функции.

Возможны два подхода к решению этой задачи:

1) Сравнение структуры восстановленной по описанию топологии принципиальной схемы со структурой исходной принципиальной схемы.

Пусть заданы две принципиальные схемы: $S' = \{P', P'^F, P'^S, T'\}$ и $S'' = \langle P'', P''^F, P''^S, T''\rangle$. Будем говорить, что эти две схемы **подобны**, если существуют взаимно-однозначные соответствия между множествами P' и P'', P'^F и P''^F, P'^S и P''^S такие, что для любого элемента $p' \in P'$ выполняются условия:

$$\begin{aligned} p' \in P'_i &\Leftrightarrow p'' \in P''_i, \\ p' \in P'_j &\Leftrightarrow p'' \in P''_j, \end{aligned} \tag{3}$$

где p'' - элемент множества P'', соответствующий элементу p', а P'_i и P''_i (P'_j и P''_j) - соответствующие классы из P'^F и P''^F (P'^S и P''^S соответственно).

Схемы S' и S'' назовем **эквивалентными**, если они подобны, а соответствующим классам разбиений P'^F и P''^F приписаны одинаковые значения типов элементов.

Будем считать, что реализуемая схема построена правильно, если ее восстановленная принципиальная схема эквивалентна исходной.

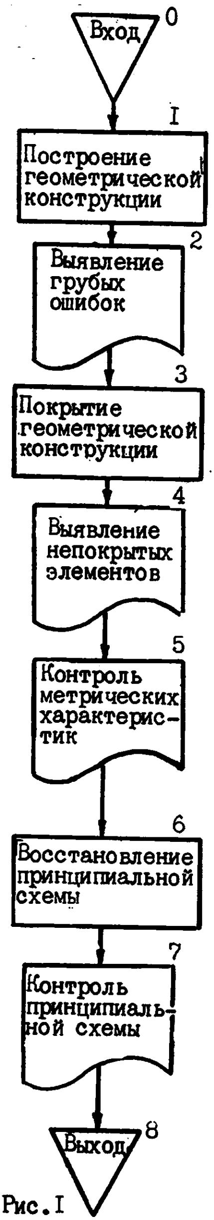

Рис.I

Задача установления эквивалентности двух принципиальных схем может быть сведена к известной задаче установления изоморфизма двух графов с помеченными вершинами. Действительно, каждую схему $S = \langle P, P^F, P^S, T \rangle$ можно рассматривать как гиперграф, вершинами которого являются элементы множества P, а гиперребрами – подмножества элементов множества P, задаваемые разбиениями P^F и P^S; при этом часть вершин отличается значениями типов элементов из T, а гиперребра – индексами F или S в зависимости от того, соответствует это гиперребро классу разбиения из P^F или P^S. Кёниговым представлением такого гиперграфа будет граф, любая вершина которого либо не помечена, либо помечена значением типа элемента или одним из индексов F или S. Очевидно, что установление факта существования изоморфизма между графами обеспечивает выполнение условий (3) для соответствующих им принципиальных схем.

2) Проверка соответствия функции, реализуемой восстановленной принципиальной схемой, заданной исходной функции. В этом случае для проверки правильности реализуемой функции по восстановленной принципиальной схеме строится функциональная схема реализуемого устройства, после чего производится тестирование ее методами функциональной диагностики или математического моделирования.

Опишем в заключение макроблок-схему алгоритма контроля топологии интегральных схем. Блок-схема алгоритма приведена на рис.I.

Исходной информацией служат послойные таблицы координат точек контуров топологии, библиотека эталонных фрагментов (для данной технологии изготовления интегральных схем) с таблицей технологических ограничений и эталонная принципиальная (или функциональная) схема. На первом этапе строится модель топологии интегральной схемы – ее геометрическая конструкция (блок I) и выявляются грубые ошибки в описании топологии (блок 2). Основная процедура, реализуемая блоком I, – выделение многосвязных областей, соответствующих компонентам геометрической конструкции. К грубым ошибкам могут быть отнесены, например, локализация точек контура вне поля фотошаблона, пересечение контуров, расположенных в одном слое, недопустимое число (например, 2) точек в контуре и т.п.

Блок 3 предназначен для построения покрытия геометрической конструкции эталонными фрагментами; в блоке 4 производится выявление непокрытых элементов геометрической конструкции.

Следующим этапом (блок 5) является контроль метрических характеристик геометрической конструкции, заданных таблицами технологических ограничений для элементов эталонных фрагментов.

В блоке 6 строится восстановленная принципиальная (или функциональная) схема, и, наконец, в блоке 7 производится контроль восстановленной схемы.

Более подробно упомянутые здесь этапы алгоритма контроля будут описаны в отдельной работе.

§6. Пример

Проиллюстрируем введенные выше понятия на примере.

На рис.2 приведен эскиз фрагмента топологии интегральной схемы, выполненной на базе КМДП-транзисторов. Литерой k с индексом на этом рисунке отмечены контуры; номера слоев для этих контуров заданы табл.I. В данном примере нет контуров, лежащих внутри областей, ограниченных контурами того же слоя, поэтому компоненты геометрической конструкции однозначно соответствуют ограничивающим их контурам.

Т а б л и ц а I

Распределение по слоям контуров описания топологии

Номер слоя	Номера контуров слоя
1	k_1
2	k_2, k_3, k_4, k_5
3	k_6, k_7, k_8, k_9
4	k_{10}, k_{11}
5	k_{12}, k_{13}, k_{14}, k_{15}
6	k_{16}, k_{17}, k_{18}, k_{19}, k_{20}

Элементы геометрической конструкции для искомого представления ξ показаны на рис.2 в виде однообразно заштрихованных связных областей. Для задания каждого элемента используется только один тип штриховки, так что

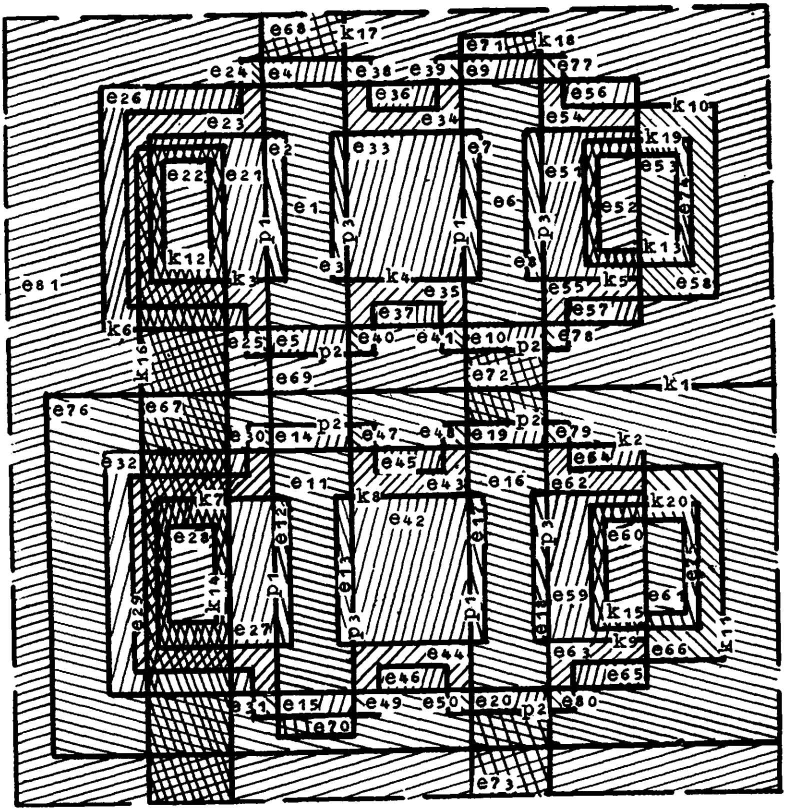

Рис. 2

области, заштрихованные дважды, входят в два различных элемента. Элементы отмечены литерой е с индексом (всего на рис.2 показан 8I элемент). Их слоевые характеристики легко могут быть вычислены по рисунку с использованием информации, содержащейся в табл. I. Для примера в табл.2 выборочно приведены слоевые характеристики некоторых элементов. Отношение смежности отдельно не показано (оно также легко восстанавливается по рисунку).

Образы эталонных фрагментов при вложении их в ξ задаются табл.3, где приведен также тип этих фрагментов. Сами эталонные фрагменты на рисунках не показаны; их число определяется числом различных типов в табл.3 (число типов эталонных фрагментов для данного примера - I3). Заметим, что,поскольку для схем на КМДП-

Таблица 2

Слоевые характеристики элементов геометрической конструкции

Номер слоя	Номер элемента												
	e1	e2	e3	e4	e5	e27	e28	e29	e30	e31	e32	e67	e68
1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	0	0
2	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	0	0
3	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	0	0
4	1	1	1	1	1	+1	1	+1	+1	+1	-1	0	0
5	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
6	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1

Таблица 3

Элементы представления геометрической конструкции

Номер образа эталонного фрагмента	Имена элементов геометрической конструкции	Тип фрагмента
1	e1 e2 e3 e4 e5	TI
2	e6 e7 e8 e9 e10	TI
3	e11 e12 e13 e14 e15	T2
4	e16 e17 e18 e19 e20	T2
5	e21 e22 e23 e24 e25 e26	SI
6	e27 e28 e29 e30 e31 e32	S2
7	e33 e34 e35 e36 e37 e38 e39 e40 e41	S3
8	e42 e43 e44 e45 e46 e47 e48 e49 e50	S4
9	e51 e52 e53 e54 e55 e56 e57 e58 e77 e78	S5
10	e59 e60 e61 e62 e63 e64 e65 e66 e79 e80	S6
11	e67	S7
12	e68	S8
13	e69	S8
14	e70	S8
15	e71	S8
16	e72	S8
17	e73	S8
18	e74	S8
19	e75	S9
20	e76	S10
21	e81	S11

Т а б л и ц а 4

Описание принципиальной схемы

Номер связи	Элемент принципиальной схемы - "Контакт"
1	1-p1, 3-p1,...
2	1-p2, 3-p2,...
3	1-p3, 2-p1
4	3-p3, 4-p1
5	2-p2, 4-p2,...
6	2-p3,...
7	4-p3

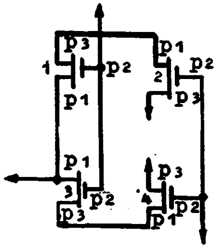

Рис. 3

транзисторах основным элементом является сам МДП-транзистор,число эталонных фрагментов с увеличением размеров фрагмента схемы будет увеличиваться незначительно. Отметим также, что в рассматриваемом примере отсутствуют изолирующие эталонные фрагменты,так как области подложки и карманов для КМДП-схем используются в качестве соединительных элементов (их тип соответствует шинам питания).

Расстояния, величины которых существенны для реализации свойств элементов схемы,должны быть заданы для эталонных фрагментов. Например, для эталонного фрагмента I (см.табл.3) существенна величина расстояния между элементами e2 и e3 (это длина канала транзистора).

Контакты (полюса) эталонных фрагментов обозначены на рис.2 литерой p с индексом; связки описаны в табл.4, в которой каждый контакт связки задан парой (I-pj) , где I - номер элемента принципиальной схемы (он же номер эталонного фрагмента в табл.3), а j - индекс контакта этого элемента. Связки определяются найденными соединительными элементами. Например,связка I (см.табл.4) определяется как объединение множеств контактов соединительных элементов 5,6 и II (см.табл.3) - это контакт p1 элемента I и контакт p2 элемента 3. Фрагмент восстановленной принципиальной схемы приведен на рис.3, где стрелками отмечены связки, которые не попали целиком в выделенный фрагмент.

Л и т е р а т у р а

1. ХРУЩЁВ В.Г. Модель геометрической конструкции.-В кн.: Автоматизация проектирования в микроэлектронике. Теория. Методы. Алгоритмы (Вычислительные системы, вып. 77). Новосибирск, 1978, с. 80-93.

Поступила в ред.-изд.отд.
14 мая 1981 года